

IB 131-2015/003

**Mischung unterschiedlicher Faserarten für die
Vliesherstellung mit Hilfe einer einfachen
Laboranlage**

M. Neumann

J. Bachmann



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

2015

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtzgemeinschaft
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

IB 131-2015/003

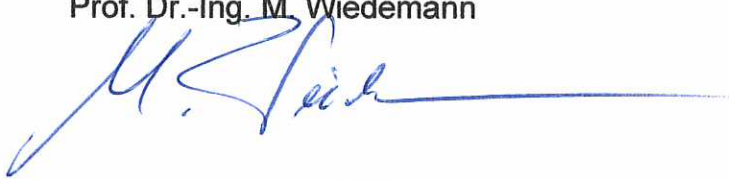
**Mischung unterschiedlicher Faserarten für die
Vliesherstellung mit Hilfe einer einfachen Laboranlage**

Braunschweig, Juli 2015

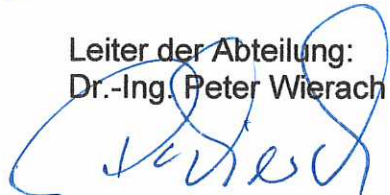
Der Bericht umfasst:

32 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Leiter der Abteilung:
Dr.-Ing. Peter Wierach



Verfasser:
Malte Neumann



Dipl.-Ing. Jens Bachmann



Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	2
3 Grundlagen	3
3.1 Vliesstoffe	3
3.1.1 Chemiefaserstoffe	5
3.1.2 Naturfaserstoffe	5
3.2 Herstellungsmethoden von Vliesstoffen	5
3.2.1 Mechanisches Verfahren	5
3.2.2 Hydrodynamisches Verfahren	6
3.2.3 Extrusionsverfahren	7
3.2.4 Aerodynamisches Verfahren	8
3.3 Hybride Faserhalbzeuge	8
4 Stand der Technik	10
4.1 Anwendungsbereiche von hybriden Faserverbundwerkstoffen	10
4.2 Faservermischung	10
4.3 Bisherige Arbeiten	10
5 Laboranlage: Entwicklung	11
5.1 Anforderungen	11
5.2 Begründete Auswahl	11
5.3 Entwicklungsstufen der Laboranlage	13
5.4 Materialbeschaffung	19
6 Laboranlage: Betrieb	21
6.1 Sicherheit	21
6.2 Versuchsdurchführung	23
6.2.1 Auflösung	23
6.2.2 Mischung	24
7 Schlussbetrachtung	26
7.1 Zusammenfassung	26
7.2 Fazit	26
7.3 Ausblick	27
8 Literaturverzeichnis	28
Anhang	29
A Faservermischung mit Hilfe eines Nassverfahrens	30
B Faservermischung mit Hilfe eines aerodynamischen Verfahrens	32
C Datentabellen	33
D Umrechnungen	37

E	Ergänzende Bilder	38
F	Technische Zeichnungen der Laboranlage	40
F.1	Konstruktionszeichnung der ersten Generation	40
F.2	Konstruktionszeichnung der zweiten Generation	50
G	Datenblatt des Gebläses	78

Nomenklatur

A	$[m^2]$	Bezugsflügelfläche
E	$[N/m^2] / [Pa]$	E-Modul
G	$[N/m^2] / [Pa]$	Schubmodul
G	$[10^6]$	Giga
I	$[A]$	Stromstärke
m	$[g]$	Masse
t	$[s]$	Zeit
T	$[^{\circ}C]$	Temperatur
T	$[K]$	Temperatur
U	$[V]$	Spannung

Griechische Symbole

γ	$[-]$	Schubdehnung (Scherung)
ε	$[-]$	Dehnung
μ	$[10^{-6}]$	Mikro
ν	$[-]$	Poisson-Zahl / Querkontraktionszahl
ρ	$[g/m^3]$	Dichte
σ	$[N/m^2]$	Spannung
τ	$[N/m^2]$	Schubspannung
Ω		

Indizes

$laengs$	Betrachtung in Längsrichtung
$quer$	Betrachtung in Querrichtung
Tm	Temperaturmaximum
wp	Wendepunkt
0	Umgebung

Abkürzungen

<i>CF</i>	Carbonfasern (<i>Kohlenstofffasern</i>)
<i>CFK</i>	Carbon-faserverstärkter Kunsstoff (<i>Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff</i>)
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
<i>FVK</i>	Faserverstärkter Kunststoff
<i>GF</i>	Glasfaser
<i>GFK</i>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<i>NF</i>	Naturfasern
<i>NFK</i>	Naturfaserverstärkter Kunststoff
<i>SFK</i>	Aramidfaserkunststoff
<i>PA</i>	Polyamid
<i>PSA</i>	Persönliche Schutzausrüstung
<i>PU</i>	Polyurethan
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid

Abbildungsverzeichnis

1	<i>Spannungs-Dehnungsänderung bei Zusammenführung von Faser und Matrix</i>	3
2	<i>Diagramm: Festigkeit über Faserdurchmesser</i>	4
3	<i>Faserflorherstellung mit Hilfe eines mechanischen Verfahrens</i>	6
4	<i>Faserflorherstellung mit Hilfe eines hydrodynamischen Verfahrens</i>	6
5	<i>Faserflorherstellung mit Hilfe eines Extrusionsverfahrens</i>	7
6	<i>Faserflorherstellung mit Hilfe eines aerodynamischen Verfahrens</i>	8
7	<i>Größenvergleich: GF, CF, Aramidfaser, menschliches Haar</i>	9
8	<i>Mögliche Varianten nach Anforderungsliste</i>	12
9	<i>Prinzipskizze zur Laboranlage der 1. Generation</i>	13
10	<i>Prinzipskizze zur Laboranlage der 2. Generation</i>	13
11	<i>Laboranlagenaufbau & Prinzipskizze der 3. Generation v1</i>	14
12	<i>Laboranlagenaufbau & Prinzipskizze der 3. Generation v2</i>	15
13	<i>Visualisierung der zirkulierenden Luftströmung</i>	16
14	<i>Fertiger Laboraufbau der 3. Generation</i>	17
15	<i>Prinzipskizze zur Laboranlage der 4. Generation v1</i>	17
16	<i>Prinzipskizze zur Laboranlage der 4. Generation v2</i>	18
17	<i>Formschlüssige Dichtungselemente</i>	18
18	<i>Die Acrylglasteile, sowie der Axialventilator</i>	19
19	<i>Dummy eines Luftstromumlenkers</i>	20
20	<i>Dummys eines Umlenkschaufelsystems</i>	20
21	<i>Endgültige Versuchsanordnung</i>	21
22	<i>Aufbau des Filters</i>	22
23	<i>Versuch einer hydrodynamische Faservermischung (NF/CF): Teil 1</i>	30
24	<i>Versuch einer hydrodynamische Faservermischung (NF/CF): Teil 2</i>	30
25	<i>Versuch einer hydrodynamische Faservermischung (NF/CF): Teil 3</i>	31
26	<i>Versuch einer aerodynamischen Faservermischung (NF/CF): Teil 1</i>	32
27	<i>Versuch einer aerodynamischen Faservermischung (NF/CF): Teil 2</i>	32
28	<i>Bearbeitung der Acrylglasteile</i>	38
29	<i>Feinstaubschutz der Ventilators</i>	38
30	<i>Ableitkegel für Fasern</i>	39
31	<i>Röhrelement</i>	39

Tabellenverzeichnis

1	<i>Anforderungsliste / Variantenvergleich</i>	12
2	<i>Daten des Versuchsprotokolls: Faserauflösung</i>	23
3	<i>Daten des Versuchsprotokolls: Fasermischung</i>	25
4	<i>Vergleich: Klassische Werkstoffen und Kunststoffe</i>	33
5	<i>Eigenschaften von Mischfasergeweben</i>	33
6	<i>Physikalische Eigenschaften von Verstärkungsfasern</i>	34
7	<i>Physikalische Eigenschaften verschiedener Fasern</i>	35
8	<i>Berechnungen für die Auslegung der Laboranlage</i>	36

1 Einleitung

„Everything that can be invented has been invented.“ (deutsch: „Alles, was erfunden werden kann, wurde bereits erfunden.“) Diese Worte sagte 1899 der damalige Leiter des amerikanischen Patentamtes Charles H. Duell. Bereits 1902, nach dem Ausscheiden aus dem Dienst, entgegnete er im Gegensatz zu 1899, wie sehr er sich auf die Entwicklungen des neuen Jahrhunderts freue und wünschte, er könne sie miterleben.

Der vorwiegend verwendete Baustoff für Anwendungen mit stabilen Anforderungen war Stahl. Er schuf die Möglichkeit, ein dichtes Eisenbahnnetz entstehen, gigantische Titanen die Weltmeere bereisen und Gebäude in bis dato unerreichbare Höhen wachsen zu lassen. Doch der Fortschritt lief unermüdlich weiter. Mit der Entwicklung des Computerchips wurde der Weg für Entwicklungen geebnet, die bis zu diesem Zeitpunkt lediglich Literatur mit fiktiven Inhalten zu entnehmen war: Beispielsweise die Raumfahrt. Menschen, die nicht nur in den 1890ern wie Otto Lilienthal den Erdboden, sondern wie Juri Gagarin am 12. April 1961 auch die Erde selbst verlassen. So wie im Bereich der Raumfahrt benötigte auch der technologische Fortschritt bei z.B. Flugzeugen, die schneller als der Schall fliegen, Autos, die problemlos mehrere hundert Kilometer pro Stunde fahren und Zügen, die mit hoher Geschwindigkeit eine große Anzahl an Passagieren komfortabel transportieren können, neue Materialien, die Stahl mit seinen Eigenschaften nicht mehr allein bis gar nicht mehr bedienen konnte.

Umso leichter ein Fortbewegungsmittel ist, desto weniger Energie wird gebraucht, es anzutreiben. Diese inoffizielle Grundregel in der Mobilität findet sich in nahezu allen Sparten wieder. Flugzeugteile aus Aluminium werden, sofern möglich, von leichteren kohlefaserverstärkten Kunststoffteilen (CFK) ersetzt. Ebenso geschieht dies auch in der Automobilbranche. „Leichter“ ist gleichzusetzen mit „energieeffizienter“. Aber ist „leichter“ auch gleichbedeutend mit „ökologischer“? Bei der Herstellung von CFK bzw. Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) werden große Mengen an nicht wiederkehrenden Ressourcen wie Erdöl verwendet. Außerdem entstehen bei der Produktion solcher Materialien mitunter umweltschädliche und toxische Stoffe. Um einen steten technologischen Fortschritt zu gewährleisten, ist die Entwicklung und Erforschung neuer Materialien unabdingbar.

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK), die als Fasermaterial Naturfasern (NF) verwenden, bilden eine, in den letzten zwei Jahrzehnten stark gewachsene, neue Gruppe von neuen Materialien. Durch den Einsatz der NF als Halbzeuge werden die begrenzten Ressourcen unseres Planeten geschont und die Wiederverwendbarkeit bzw. Entsorgung ökologischer gestaltet. Aufgrund ihrer Struktur ist die Verarbeitung dieser Halbzeuge jedoch nicht einfach. Meist besitzen sie, im Vergleich zu anderen Faserarten, eine kurze Faserlänge (ca. 15 mm). Um die Festigkeit des Naturfaserverbundes zu stärken, werden den NF eine bestimmte Menge an CF zugesetzt. Das Halbzeug für einen Naturfaserverstärkter Kunststoff (NFK) entsteht.

In dieser Arbeit soll anhand eines Trockenmischverfahrens (Aerodynamisches Mischverfahren) die Vermischung beider Faserarten in einem eigens konzipierten Laboraufbaus untersucht werden. Vorangegangene Arbeiten, die sich mit einem Nassmischverfahren beschäftigt haben, machten die Erprobung eines anderen Verfahrens unabdingbar. Des Weiteren soll der Aspekt der Gesundheitsgefährdung und der Kurzschlussgefahr durch Kohlestaub während der Verwendung des Aufbaus beleuchtet werden.

Der thematische Einstieg erfolgt durch ein Grundlagenkapitel und dem Stand der Technik. Anschließend wird über zwei Kapitel die Entwicklung und der Betrieb des Laboraufbaus erläutert. Abschließend folgt die Schlussbetrachtung und das Fazit dieser Arbeit mit einem Ausblicks auf mögliche zukünftige Schritte.

2 Aufgabenstellung

DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Abteilung Multifunktionswerkstoffe (MFW)
Betreuer: Dipl.-Ing. Jens Bachmann

Thema: Mischung unterschiedlicher Faserarten für die Vliesherstellung mit Hilfe einer einfachen Laboranlage

Nachwachsende Rohstoffe erfreuen sich in Zeiten knapper Ressourcen und der Sensibilisierung auf Themen wie energieeffiziente Werkstoffe und Bauweisen einer erhöhten Nachfrage. Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) sind in der Lage eine ökologisch als auch ökonomisch vorteilhafte Alternative gegenüber glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) zu sein. Bisherige Einsatzgebiete beschränken sich durch die vergleichsweise geringen mechanischen Eigenschaften allerdings vor allem auf unkritische Anwendungen wie z.B. Verkleidungselemente im Automobilbau. Durch den steigenden Einsatz von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in der Luftfahrt und auch im Automobilbau steigt die Menge an Abfall. Methoden zum Recycling von CFK, z.B. Pyrolyseverfahren, erzeugen gekürzte Kohlenstofffasern die allerdings nicht mehr für die Ursprungsanwendung in hoch belastbaren Faserverbundstrukturen verwendet werden können (Downcycling). Vliesstoffe aus diesen Recyclingfasern sind eine Alternative, die durch den geringeren Preis auch neue Einsatzgebiete für Kohlenstofffasern (CF) erschließen können. Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung von rezyklierten CF (rCF) ist die Mischung mit anderen Fasern zu Hybridhalbzeugen um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Beispielsweise lassen sich mit rCF die mechanischen Eigenschaften von NFK verbessern. Die Mischung mit Naturfasern stellt die Anlagentechnik allerdings vor Probleme, da diese Fasern beim Mischen (z.B. im Wasserbad) sehr schnell verknoten. Das Thema der Studienarbeit von Malte Neumann ist es, für Versuche eine Vorrichtung zum aerodynamischen Auflösen und Mischen von Naturfasern (NF) und CF zu konstruieren. Dafür werden geschnittene Flachfasern (15mm) und neuwertige CF-Schnittfasern (10mm) zur Verfügung gestellt. Die Laboranlage soll möglichst kompakt sein und unter Berücksichtigung gesundheitlicher Aspekte (CF-Stäube) aufgebaut werden.

- Einarbeitung in das Themengebiet der Faserverbundwerkstoffe, im speziellen Bioverbunde und deren Herstellungsmethoden.
- Literatur- und Patentrecherche zu folgenden Themen:
 - Vliesstoffherstellungsmethoden
 - Hybride Vliesstoffe
- Aufbau einer Laboranlage zur aerodynamischen Fasermischung von NF und CF
 - Konzepte
 - Begründete Auswahl
 - Materialbeschaffung
 - Aufbau und Test
- Optional: Herstellung von Verbundplatten aus Labor-Mischfaservliesen
- Beachtung der Gesundheitsgefährdung und der Kurzschlussgefahr (CF)
- Schriftliche Ausarbeitung in Form einer Studienarbeit

3 Grundlagen

3.1 Vliesstoffe

Vliesstoffe sind nach [ISO 9092] definiert. Sie werden aus gerichtet angeordneten oder wahllos zueinander befindlichen Fasern in Form einer Schicht, eines Vlieses oder eines Faserflors gebildet. Ausschließlich Reibung und/oder Kohäsion bzw. Adhäsion gewährleisten den losen Zusammenhalt unter dem Fasermaterial. Diese Definition schließt Papier und verarbeitete Faserhalbzeuge, die in jeglicher Art maschinell verwebt wurden, aus. Bei Papieren ist es daher begründet, da zwischen Fasern keine oder nahezu keine Wasserstoffbrückenbindungen bestehen. [1] Faserstoffe teilen sich grundlegend in zwei Bereiche auf:

- Chemiefaserstoffe
- Naturfaserstoffe.

Dabei ist die Länge der Fasern, von wenigen Millimetern bis hin zu Endlosfasern, nicht festgelegt.

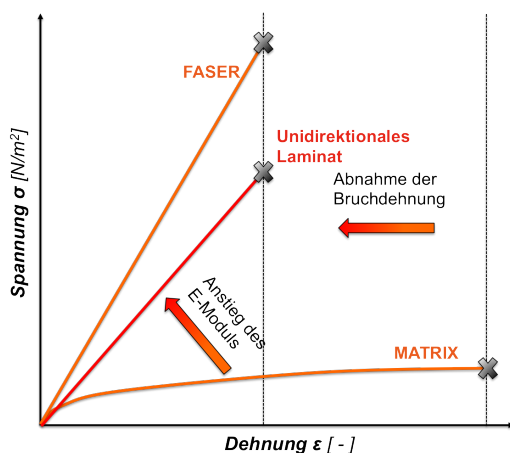


Abbildung 1: Spannungs-Dehnungsänderung bei Zusammenführung von Faser und Matrix [2])

Im Verbundwerkstoff von Fasern und Matrix bestimmt das Fasermaterial maßgeblich die Festigkeit des Werkstoffes. In Abbildung 1 sind die physikalischen Eigenschaften von Faser und Matrix in Bezug auf Spannung und Dehnung dargestellt. Es sei angemerkt, dass dieses Diagramm unidirektionale Fasern betrachtet. Dies lässt sich auf einen wirr angeordneten Vliesstoff übertragen, indem eine einzelne Faser und im Mengenvergleich eine vergleichbare Menge an Matrixmaterial betrachtet wird. Zu sehen ist, dass die Faser eine erheblich höhere Spannung zulässt, bevor das Material in Form eines Sprödbruchs zerstört wird. Bei ansteigender Belastung bis zum Sprödbuch ist die Dehnung des Materials lediglich minimal. Im Gegensatz dazu ist im Vergleich zur Faser die Matrix äußerst duktil. Dies geschieht jedoch auf

Kosten der Spannungsunempfindlichkeit. Eine Kombination beider Materialien zu einem Verbundwerkstoff legt die Vor- und Nachteile in einen neuen Werkstoff zusammen (rote Linie).

Mit Hilfe folgender Gleichungen werden einige der grundlegenden, physikalischen Größen der Fasern bestimmt:

$$\text{Hook'sche Gesetz} : \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{Poisson - Zahl (Querkontraktionszahl)} : \nu = - \frac{\varepsilon_{\text{quer}}}{\varepsilon_{\text{laengs}}} \quad (2)$$

$$\text{Scher - / Schubspannung} : \tau = G \cdot \gamma \quad (3)$$

$$\text{Schubmodul / E - Modul} : G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

Die Wahl, einen Faserverbundwerkstoff zu verwenden, wird auf vier auftretende Paradoxien begründet.

Das **Paradoxon der Faserform** beschreibt, dass ein Werkstoff in Faserform eine vielfach höhere Festigkeit besitzt als das gleiche Material in anderer Form. Je dünner die Faser dabei ist, desto größer

ist die Festigkeit. (A. A. Griffith) [3] Dies wird in Abbildung 2 mittels Prüfergebnissen aufgezeigt. Der Verlauf lässt sich dahingehend begründen, dass mit geringerem Volumen, die Anzahl der Fehlstellen im Material sinkt. Beispielsweise ist eine Strebe mit 5 cm Durchmesser und einer Länge von ebenfalls 50 cm in axialer Richtung mechanisch anfälliger als mehrere Streben mit selber Länge, jedoch mit nur 1 cm Durchmesser, welche zu einem „Strebenbündel“ von 5 cm Durchmesser verschnürt sind.

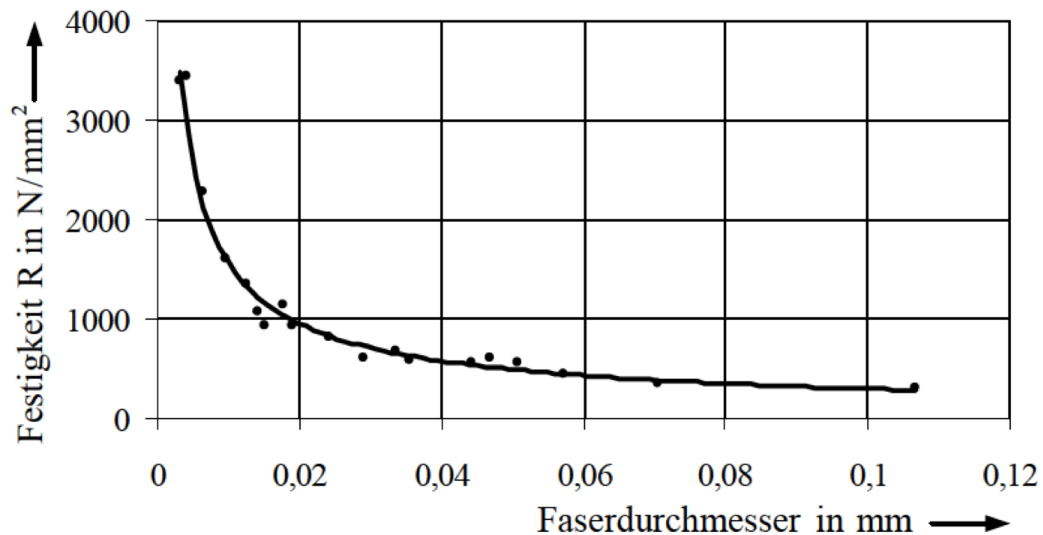


Abbildung 2: Diagramm: Festigkeit über Faserdurchmesser [4]

Das **Paradoxon der Einspannlänge** besagt, dass je kleiner die Einspannlänge einer Faser ist, desto größer ist die an dieser gemessene Festigkeit. Die Einspannung innerhalb eines FVK wird durch die Matrix erzeugt. Im Idealfall ist die Einspannung null. Dies entspricht einer vollständigen Umhüllung der Faser mit 100 prozentiger Haftung der Matrix. In der Realität ist es jedoch schwierig einen idealen Materialverbund herzustellen. Es wird versucht, mit Hilfe von Schichten und anderen Additiven, einen möglichst großen Formschluss zu erreichen. Der Verlauf eines Diagramms von Zugfestigkeit in $[N/mm^2]$ über Einspannlänge in $[mm]$ ähnelt dem Verlauf in Abbildung 2. Dies lässt sich ebenfalls über die Anzahl der Fehlstellen im Material begründen. Umso kleiner die Einspannlänge ist, desto geringer ist die Anzahl der Fehlstellen zwischen den Einspannungen.

Das **Paradoxon des Verbundwerkstoffes** besagt, dass ein Verbundwerkstoff als Ganzes Spannungen aufnehmen kann, die die schwächere Komponente zerbrechen würde, während von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden kann, als wenn diese alleine belastet würde. (G. Slayter) Greift eine Kraft am Verbundwerkstoff an, kann diese den maximalen Widerstand des schwächeren Verbundbestandteils überschreiten. Normalerweise würde sich dieser verformen und schließlich brechen. Im Verbund nimmt jedoch das stärkere Material einen Großteil der Kraft auf und verringert den am schwachen Material angreifenden Anteil erheblich. Des Weiteren erhöht sich im Verbund die maximal zulässige Belastung der Fasern, im Vergleich zu einer Kräftebeaufschlagung ohne Matrixmaterial.

Als viertes und letztes folgt das **Paradoxon des festen Werkstoffes**. Die wirkliche Festigkeit eines festen Stoffes ist sehr viel niedriger als die theoretisch berechnete (F. Zwicky). Bei jeglicher Materialwahl muss dies beachtet werden. Eine Schlussfolgerung aus Tabelle 4 auf Seite 33 ist, dass das solide Gittergefüge der klassischen, aufgenommenen Werkstoffe beständiger ist, als die Gefüge aus verschlungenen Kohlenwasserstoffketten bei den Kunststoffen.

3.1.1 Chemiefaserstoffe

Chemiefaserstoffe besitzen meist Fasern mit großer, bzw. unendlicher Länge. Die Basisbestandteile werden zum Einen aus *natürlichen Polymeren pflanzlicher* oder *tierischer Herkunft* bezogen.

Des Weiteren können sie auch synthetisch hergestellt werden. Dies geschieht mit der künstlichen Bildung von organischen Kohlenwasserstoffketten mit Hilfe von *Polykondensation*, *Polymerisation* bzw. *Polyaddition*. Auf diese Weise entstehen ein Großteil der Chemiefaserstoffe und beinhalten bekannte Materialien, wie Polyamid (PA), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyurethan (PU).

Eine dritte Möglichkeit ist die Herstellung von Faserstoffen auf *anorganischer Basis*. Hierzu zählen Glasfaserstoffe und Metalfaserstoffe. [5]

3.1.2 Naturfaserstoffe

Naturfasern sind meist aus Faserbündel mit kurzer Länge zusammengesetzt und können zum einen aus pflanzlichen Fasern, den *Zellulosefasern*, hergestellt werden. Besonders im Bereich der Kleidungs-textilien zählt hierzu Baumwolle. In Ingenieur Anwendungen wird jedoch eher auf Bastfasern wie Flachs, Hanf oder Jute zurückgegriffen. Hartfasern, wie Kokos, finden bisher noch nicht große Verwendung in technischen Bereichen.

Tierische Fasern, die *Eiweißfasern*, werden in größeren Mengen in der Textilbranche eingesetzt. Hierzu zählen Schafwolle, Ziegenhaare, sowie jegliche weiteren Tierhaare. Seidenfasern, wie die Maulbeer-seide und die Tussaheide, werden ebenfalls zu den Eiweißfasern gezählt.

Des Weiteren zählt der im vergangenen Jahrhundert oft verwendete Asbest als Untergruppe der *mineralischen Fasern* zum Bereich der Naturfaserstoffe. [5]

Für die Herstellung von Endprodukten müssen Faserstoffe zu Vliesstoffen weiterverarbeitet werden. Im nachfolgenden Kapitel sollen die unterschiedlichen Herstellungsmoden benannt und deren Funktionsweise erläutert werden.

3.2 Herstellungsmethoden von Vliesstoffen

Die Herstellungsmethoden teilen sich in zwei Bereiche auf:

- **Trockenverfahren**
- **Nassverfahren.**

Dem Trockenverfahren untergeordnet werden das ***mechanische Verfahren***, das ***Extrusionsverfahren*** und das ***aerodynamische Verfahren***, dem Nassverfahren das ***hydrodynamische Verfahren***. Im Folgenden sollen die Untergruppen näher erläutert werden, wobei auf das aerodynamische Verfahren im Besonderen eingegangen werden soll.

3.2.1 Mechanisches Verfahren

Bei einem mechanischem Verfahren zur Vliesherstellung wird das Rohmaterial in Form von Ballen oder großen Flocken einem Auflöseprozess hinzugefügt. Anschließend werden die Fasern gerichtet und übereinander gestapelt als Faserflor ausgegeben. Der genaue Ablauf ist in Abbildung 3 skizziert.

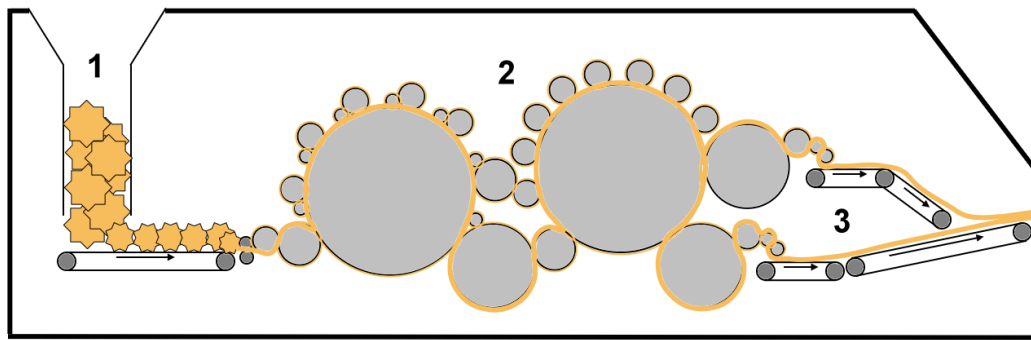


Abbildung 3: Faserflorherstellung mit Hilfe eines mechanischen Verfahrens [1]

Als erstes werden Faserballen oder große, grobe Faserflocken in die Maschine gegeben (1). Über eine Fördereinrichtung werden sie zur Krempel oder Karde geführt. Dort beginnt der Auflöse- und Ordnungsprozess (2). Unter Auflösung wird die Aufteilung der zusammenhängenden Fasern verstanden. Bei der Ordnung werden die einzelnen Fasern parallel zueinander ausgerichtet. Krempeln sind mit kleinen Haken ausgestattete Trommeln, an denen sich die Fasern verhängen. Eine Karde hat die gleiche Funktion wie eine Krempel, nur besitzt sie anstatt Haken Vertiefungen. Durch das ständige Reißen an der wirt liegenden Faserschicht fängt diese an, sich zu ordnen. Am Ende des Krempelvorgangs sind bei der hier skizzierten Anlage zwei Faserflore entstanden (3). Diese werden zusammengeführt und als einer zur Weiterverarbeitung abgeführt. Je nach Anforderung können weitere Flore übereinandergelegt oder produziert werden.

3.2.2 Hydrodynamisches Verfahren

Bei einem hydrodynamischen Verfahren zur Vliesherstellung wird das Rohmaterial in Form von groben Faserflocken in einem mehrstufigen Wässerungsprozesses aufgelöst und nach einem Press- und Trocknungsvorgang als Flor ausgegeben. Eine mögliche Anordnung ist in Abbildung 4 skizziert.

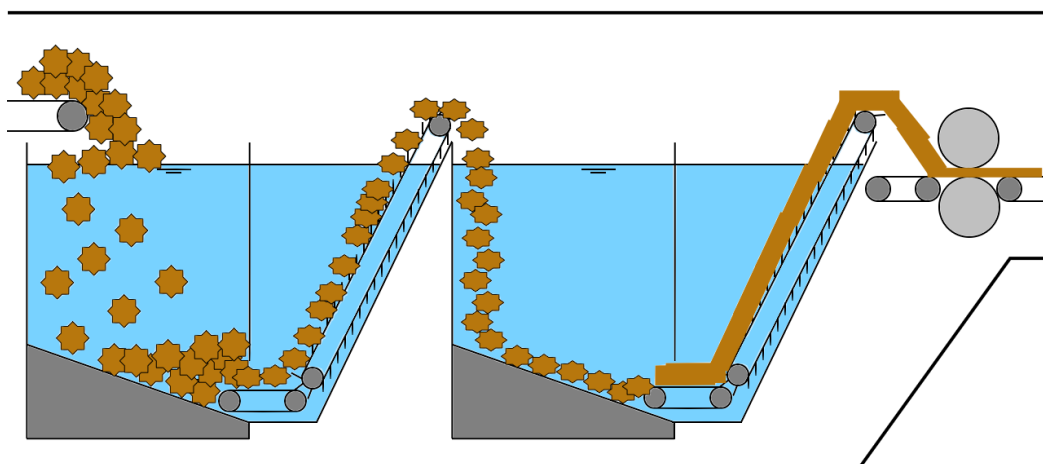


Abbildung 4: Faserflorherstellung mit Hilfe eines hydrodynamischen Verfahrens [1]

Die Faserflocken werden über eine Fördereinrichtung in ein Wasserbassin geführt. Dort werden sie mit Wasser durchtränkt und sinken zu Boden. Dadurch beginnen sich die Fasern aufzulösen. Am Boden angekommen werden sie konstruktionsbedingt zu einem Förderband geführt. Dieses transportiert die leicht aufgelösten Fasern zu einem zweiten Wasserbassin. Dort findet derselbe Prozess wie im ersten statt. Durch das Absinken werden die Fasern nicht nur aufgelöst, sie vermischen sich zusätzlich untereinander. Aus diesem Grund folgt nach dem Transport aus dem letzten Becken eine Kardierung, sofern diese erwünscht ist. Eine Anlage, die ein hydrodynamisches Verfahren zu Grunde liegt, ist in der Lage, Faserorientierungen von nahezu parallel bis hin zu fast zufällig liegenden Fasern herzustellen. Anschließend wird über eine Presseinrichtung das aufgenommene Wasser aus den Fasern gepresst und über eine Trockeneinrichtung getrocknet. Das entstandene Faserflor ist nun bereit zur Weiterverarbeitung.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der oben beschriebene Herstellungsprozess ein Ausschnitt aus mehreren, möglichen Herstellungsprozessen bildet. Maßgeblich für ein hydrodynamisches Herstellungsverfahren ist die Faserauflösung im Wasser. Dies kann z.B. ebenfalls innerhalb einer Wasserströmung oder mit Hilfe von Wasserstrahlen geschehen.

3.2.3 Extrusionsverfahren

Bei einem Extrusionsverfahren zur Vliesherstellung wird das Rohmaterial in Form von geschmolzenem Polymer-Granulat über Düsen zu Garnen verarbeitet. Diese werden verfestigt und im Anschluss als zufällige Lagen auf einem Förderband abgelegt. Zu sehen ist eine mögliche Umsetzung in Abbildung 5.

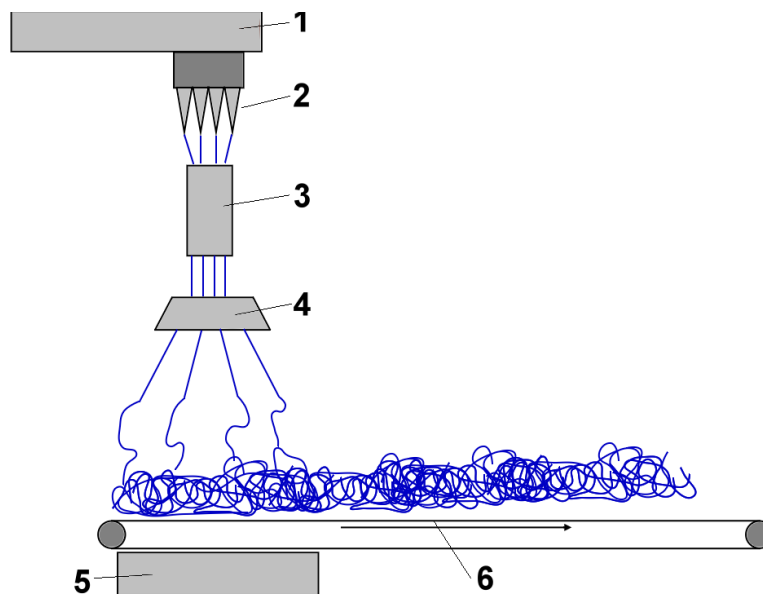


Abbildung 5: Faserflorherstellung mit Hilfe eines Extrusionsverfahrens [1]

Polymermaterial wird über einen **Extruder (1)** erhitzt und als breiartige Masse an die **Düsen (2)** abgegeben. An diesen tritt das Material in Form eines Fadens aus. Damit die entstandenen, noch warmen Fäden abkühlen und gerichtet nach unten geführt werden können, werden sie von einer **Sauganlage (3)** geordnet und abgekühlt. Anschließend durchlaufen die Fäden einen **Filamentspreizer (4)**. Dieser kann aus Blechen oder aus einer elektrostatischen Anlage bestehen. Er sorgt dafür, dass die Fäden gleichmäßig verteilt auf ein **Förderband (6)** fallen. Um eine genaue Fallrichtung vorzugeben, ist unter-

halb des Förderbandes eine **Ansaugeinrichtung (5)** angebracht. So setzen sich alle Fäden auf dem Förderband ab und ein Flor entsteht.

3.2.4 Aerodynamisches Verfahren

Bei einem aerodynamischen Verfahren zur Vliesherstellung wird das Rohmaterial in Form von kurzen Faserflocken einem Auflöseprozess zugeführt. Da auf Grund der Faserlänge eine genaue Parallelisierung nicht einfach umsetzbar ist, wird dieses Verfahren bei nicht gerichteten Faserfloren verwendet. Durch den Fasertransport durch die Luft, lösen sich die Flocken stetig auf. Die Einzelfasern (Idealfall) werden zusammengeführt und als Flor der Maschine entnommen. Ein möglicher Herstellungsprozess ist in Abbildung 6 skizziert.

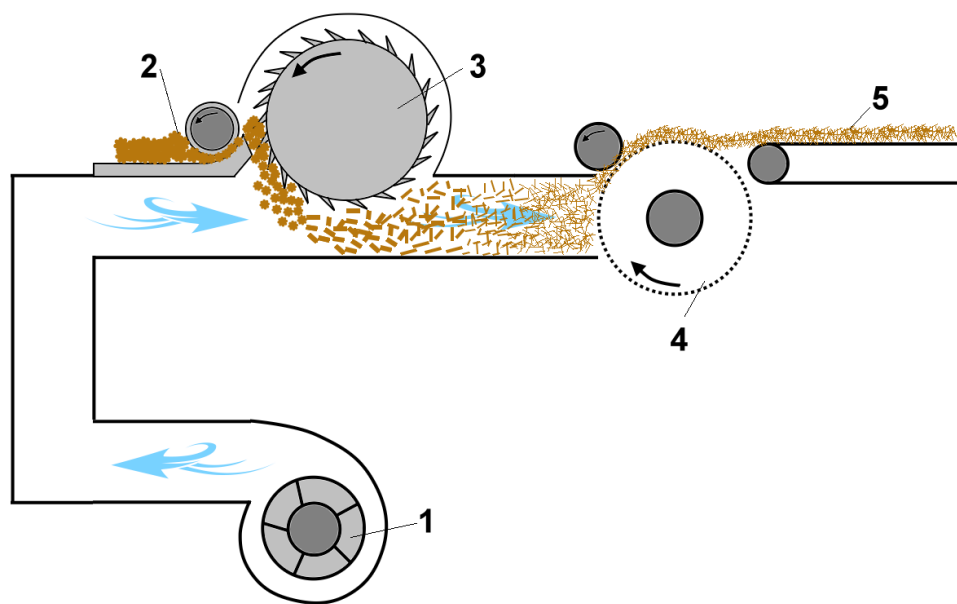


Abbildung 6: Faserflorherstellung mit Hilfe eines aerodynamischen Verfahrens [1]

Ein **Gebläse (1)** erzeugt innerhalb des Transportkanals einen Luftstrom. Der Luftstrom wird auf einer **luftdurchlässigen Trommel mit poröser Oberfläche (4)** abgeführt. Die Faserflocken werden zunächst **voraufgelöst (2)**. Dies ist besonders bei aerodynamischen Verfahren von Bedeutung, da ansonsten die Auflösung innerhalb des Luftstroms nicht effizient vollzogen werden kann. Über eine **Karde (3)** werden die voraufgelösten Flocken dem Luftstrom zugeführt. Durch den Transport in einer turbulenten Strömung lösen sich die Fasern auf. Sie werden auf die luftdurchlässige Trommel gedrückt und mit weiteren Fasern zu einem **Flor (5)** verarbeitet. Dieses besitzt keine innere Orientierung.

3.3 Hybride Faserhalbzeuge

Hybride Faserhalbzeuge bestehen nicht nur aus einer Faserart. Benötigen bestimmte Vliesstoffe eine besondere Festigkeit, so wird das Fasergefüge durch Einarbeitung meist von Textilglasrovings, Aramid- oder Kohlenstoff-Fasern ergänzt. [6] Diese werden bereits bei Herstellung des Flores den Ausgangsfasern zugemischt. Ein hybrider Vliesstoff entsteht. Um ein ideales hybrides Faserhalbzeug zu erhalten, muss die Verteilung beider Faserarten im Verbund gleichmäßig sein. Die Auflöse- und Mischprozesse müssen insofern angepasst werden, so dass eine gute Verteilung beider Fasern im Flor gewährleistet werden kann.

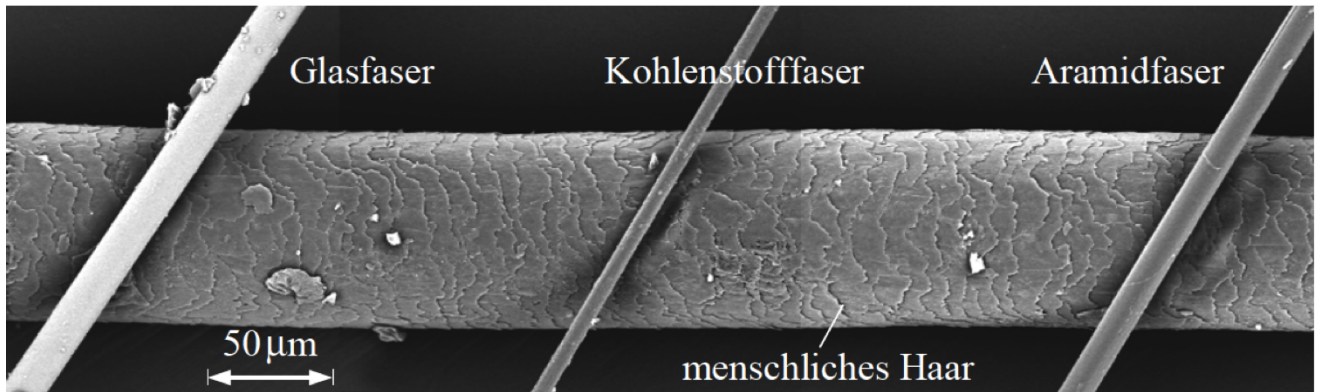


Abbildung 7: Größenvergleich: GF, CF, Aramidfaser, menschliches Haar [4]

Sollen beispielsweise NF mit CF vermischt werden, so hilft zur Veranschaulichung der Problematik Abbildung 7. Die Größe eines NF kann hierbei mit der eines menschlichen Haares verglichen werden. Jedoch nicht nur die unterschiedlichen Fasergrößen muss bei der Vermischung beachtet werden. Die verschiedenen Dichten der einzelnen Faserarten muss ebenfalls bei der Auswahl des Vermischungsvorgangs berücksichtigt werden. Nicht zu vernachlässigen sind auch die Stoffeigenschaften. Reagieren die einen Fasern beispielsweise hydrophob und die anderen hydrophil, ist ein Vermischungsvorgang in einem wässrigen Medium nicht leicht umzusetzen.

4 Stand der Technik

4.1 Anwendungsbereiche von hybriden Faserverbundwerkstoffen

Das hinzugefügte Fasergewebe richtet sich nach der Art der Anwendung des fertigen Werkstoffs. Im Bereich des Segelflugzeugbaus werden die meisten Teile aus **GFK** hergestellt. Tragflächen müssen große, dynamische Lasten durch Böen etc. aufnehmen können, jedoch gleichzeitig eine gewisse Steifigkeit besitzen. Dies ist schwer mit nur einer Faserart zu bewerkstelligen. GFK sind zwar vergleichsweise günstig, leicht, duktil und können somit die dynamischen Belastungen gut abfedern, jedoch würden sich die Tragflächen im Flug stark durchbiegen. Das Material ist nicht steif genug. Dies könnte entweder durch die Aufbringung einer zusätzlichen Versteifungsschicht, was mit einer nicht trivialen Gewichtszunahme gleichzusetzen ist, oder durch Hinzugabe von CF in den Herstellungsprozess geschehen. CF im Verbund mit GFK erhöhen zwar nicht die Festigkeit des Werkstoffes, steigern jedoch dessen Steifigkeit. [3]

Ein Bauteil aus **CFK** besitzt, je nach Faserorientierung, eine große Steifigkeit, jedoch ist es äußerst anfällig für Schläge. Durch die geringe Dehnbarkeit des Materials bricht es bei zu großer Dehnung abrupt in einem Sprödbbruch. Um die Schlagempfindlichkeit eines solchen Werkstoffs zu verringern, empfiehlt sich der Einsatz von Aramidfasern als Hybridgewebe. Angewendet werden diese Mischgewebe z.B. im Sicherheitsbereich bei Schutzhelmen oder im Sportbereich bei Snowboards. [3]

Finden Hybridgewebe von CFK und GFK in Bereichen Anwendung, bei denen große Belastungen oder hohe Sicherheiten verlangt werden, beschränken sich die **NFK**-Hybride größtenteils auf den Textilbereich. Die Kombination von NF mit Chemiefasern, wie Elastan, erhöhen beispielsweise den Tragekomfort einer Kleidungstextilie. Der Einsatz von Polyester steigert die Strapazierfähigkeit des Materials bei Outdoor-Bekleidung. Die Verwendung von Polyacryl im Hybridgewebe macht das Material pflegeleichter. Dies ist z.B. bei Trainings- oder Jogging-Bekleidung der Fall. [7]

4.2 Faservermischung

Die Fasermischung kann auf verschiedene Weisen statt finden. Werden durch Extrusion Endlosfasern erzeugt, können diese mit Verstärkungsfasern zunächst versponnen werden, bevor die entstandenen Faserhybride weiterverarbeitet werden. Bei Kurzfasern muss der Vermischungsvorgang vor der Florbildung geschehen. Durch Nadelmaschinen werden die Fasergemische ineinander verwoben. [6] Eine Wasserstrahlverfestigung besitzt den gleichen Effekt.

4.3 Bisherige Arbeiten

In einer vorangegangenen Arbeit wurde eine Faservermischung zwischen NF und CF untersucht. Das hybride Faserflor sollte mit Hilfe eines hydrodynamischen Verfahrens hergestellt werden. Für den Vermischungsprozess wurde demnach Wasser als Medium verwendet. Hierzu wurde eine Mischungsanlage im Labormaßstab entwickelt. Bei der Durchführung traten jedoch für eine homogene Vliesbildung unerwünschte Effekte auf. Der hydrophile Kohlenstoff verteilte sich beim Mischvorgang gut im Wasser. Die hydrophoben Faserflocken jedoch ließen sich schlecht auflösen und mit den CF mischen. Das Ergebnis waren ungünstige und ungleichmäßige Verteilungen von CF und NF über der Fläche des Flores.

Ein Vermischungsvorgang im Wasser ist im Anhang unter den Abbildungen 23, 24 und 25 auf Seite 30 (ff) zu sehen. Gut zu erkennen sind die nur teilweise aufgelösten Faserflocken im Wasser und die ungleiche Verteilung der Fasern im Endprodukt. Um den in den Abbildungen gezeigten Vermischungsgrad zu erreichen, musste ein zeitlich gesehen langer Vermischungsvorgang betrieben werden. Eine Vermischung im Wasser hat sich dadurch nicht als effektiv erwiesen.

5 Laboranlage: Entwicklung

5.1 Anforderungen

Die zu entwickelnde Laboranlage soll in der Lage sein, NF und CF zu vermischen und im Idealfall ein gleichmäßig vermischtes Faserflor zu erzeugen. Dies soll mit Hilfe eines aerodynamischen Verfahren geschehen. Sie soll kosteneffizient und so platzsparend wie möglich konstruiert werden. Außerdem ist zu gewährleisten, dass die Gefahr der Aufnahme von Kohlenstaub über die Atemwege nicht besteht.

5.2 Begründete Auswahl

Als erster Schritt wurde eine Anforderungsliste erstellt, um einen geeigneten Einsatz der Luftströmung zu realisieren. Diese beinhaltet folgende Merkmale:

- Auflösefähigkeit der Fasern
- Gleichmäßige Verteilung der Fasern im Gefüge
- Beliebige Einstellbarkeit des Mischverhältnisses
- leichte Entnahme des Flores
- Kein Haften der Fasern an der Anlageninnenseite
- leichte Reinigung der Anlage nach dem Betrieb
- Umsetzbarkeit der Anlage im Labormaßstab

Auf Basis dieser Anforderungen wurden mehrere Varianten skizziert und deren Eigenschaften in Tabelle 1 bewertet.

Variante 1 beinhaltet lediglich die grundsätzlichen Bestandteile. Diese sind zum einen ein Gebläse mit einem oberhalb davon angebrachten, feinen Gitter. Auf diesem werden vor Inbetriebnahme die Fasern abgelegt. Nachdem das Gebläse abgeschaltet wird, setzen sich die verwirbelten Fasern auf dem Gitter ab.

Variante 2 wird zusätzlich zu den Bestandteilen aus Variante 1 ein grobes Sieb hinzugefügt. Dieses soll die Auflösung der Faserflocken unterstützen.

Bei **Variante 3** wird der Luftweg verlängert. Die Fasern werden hierbei aufgrund des längeren Transportweges besser aufgelöst und an der Austrittsöffnung auf ein Sieb geblasen. Dieses lässt sich nach einem Durchlauf leicht mit dem darauf befindlichen Flor entnehmen.

Variante 4 sieht einen geschlossenen Luftkreislauf vor. Ein Gleichrichter nach dem Gebläse ordnet zunächst die Luftströmung. Dieser soll die radiale Luftströmung in eine annähernd axiale umwandeln. Die Fasern werden innerhalb einer turbulenten Strömung durch die Rohrleitung transportiert und lösen sich auf. Anschließend werden sie auf ein Sieb gedrückt. Die Sogwirkung des Gebläses zieht von oben kommende Fasern zu Schwachstellen des auf dem Sieb abgesetzten Flores.

Im Folgenden werden die verschiedenen Varianten skizziert und miteinander mit Hilfe einer Tabelle anhand der gestellten Anforderungen bewertet.

Legende für Tab. 1: – *sehr schlecht*; - *schlecht*; 0 *neutral*; + *gut*; ++ *sehr gut*

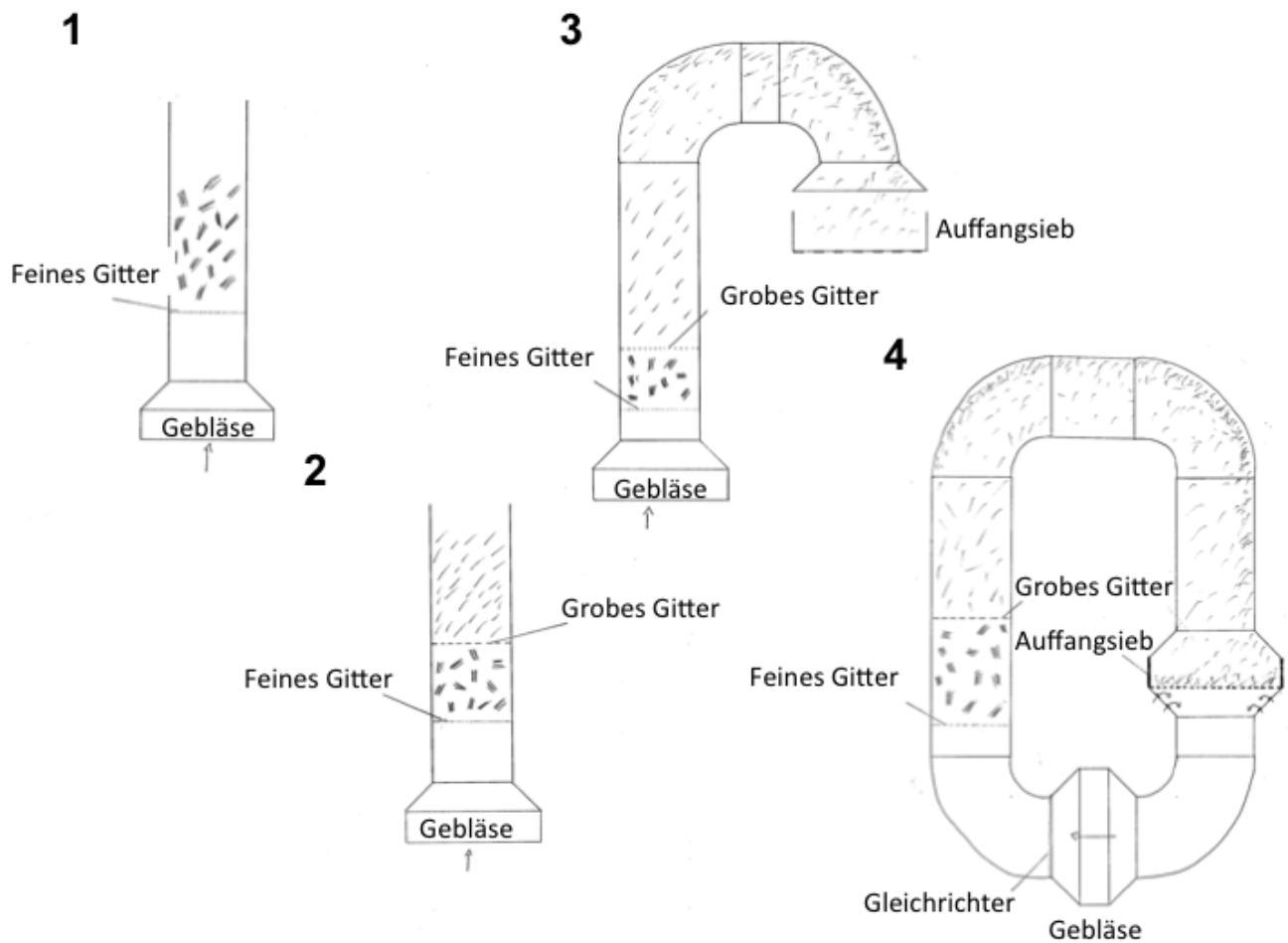


Abbildung 8: Mögliche Varianten nach Anforderungsliste

Anforderungen / Varianten	1	2	3	4
Einzelfasern	- -	0	+	++
gleichmäßige Verteilung	-	-	-	+
ideales Mischverhältnis	-	0	0	+
leichte Entnahme des Vlieses	0	0	++	+
Kein Haften (Innenflächen)	+	+	0	0
turbulente Strömung	0	0	0 / +	0
leichte Reinigung der Anlage	++	+	0	-
Umsetzbarkeit	++	++	+	0
Gesamtdurchschnitt	0	0	0 / +	0 / +

Tabelle 1: Anforderungsliste / Variantenvergleich

5.3 Entwicklungsstufen der Laboranlage

Variante 4 besitzt viele Vorzüge und ist lediglich im Bereich der Reinigung deutlich unterlegen. Nicht in der Anforderungsliste aufgeführt ist die Materialkomplexität. Sie ist ausschlaggebend für das Zurückstellen dieser Variante. Da hohe Investitionen nötig sind, um diesen Aufbau zu realisieren, muss ein weniger komplexer Aufbau gewählt werden.

Variante 3 hingegen ist zwar simpler gestaltet, jedoch würden durch die oberen, gebogenen Rohrprofile ebenfalls zu hohe Kosten entstehen.

Variante 1 ist wiederum zu minimalistisch, um eine erfolgreiche Vermischung annehmen zu können. Aus diesen Gründen wird auf Grundlage von Variante 2 die erste Version der Laboranlage entwickelt. Fasern sollen durch einen nach oben gerichteten Luftstrom verwirbelt werden, sich auflösen und vermischen, um sich anschließend als Flor abzusetzen.

1. Generation

Anhand der Prinzipskizze (rechts: Abbildung 9) soll die grundlegende Funktionsweise der Laboranlage erläutert werden.

Luftströme steigen vom Bodenbereich mit Hilfe eines Gebläses auf. Diese durchdringen ein feines Sieb, auf dem das Fasermaterial abgelegt ist und in die Ströme aufgenommen wird. Anschließend passieren sie einen Bereich mit Filterstreben, deren Anschlussöffnungen in der technischen Zeichnung ab Seite 40 (ff) zu finden sind. Im oberen Aufbau werden die Fasern, von drei Seiten kommend, auf ein Auffangsieb geblasen, dessen Öffnung zu einem seitlich an der Laboranlage endenden Abluftkanal mündet.

Als Orientierung wird die Dimensionierung der Apparatur auf Basis einer definierten 200 x 100 mm Auffangsieboberfläche vorgenommen. Um in der Lage zu sein, den Mischvorgang zu beobachten, wird Acrylglas als Material für die Einzelteile verwendet.

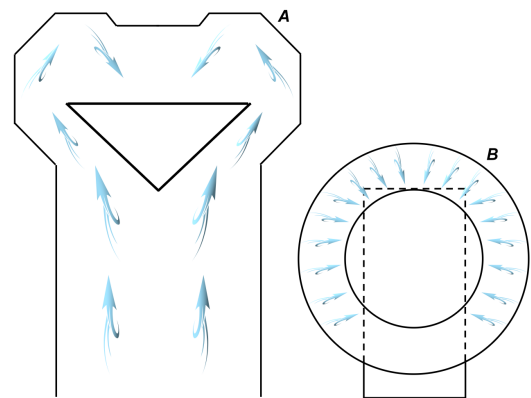


Abbildung 9: Prinzipskizze: 1. Generation

2. Generation

Um die Fremdfertigung der zu benötigten Teile, zu minimieren, wird die Struktur des oberen Aufbaus und des Unterbaus des Auffangsiebs vereinfacht. Der Einsatz von zylindrischen Bauteilen wird der Umsetzung halber bevorzugt. Des Weiteren soll eine Strukturveränderung die Luftströme im Bereich des Auffangsiebes optimieren. In der ersten Generation wurde das Fasermaterial über drei Zuströmwege der Sieboberfläche zugeführt (Siehe Abbildung 9B). Da dies eine ungleichmäßige Verteilung der Fasern zur Folge hätte, wurde das rechteckige Sieb gegen ein kreisförmiges Sieb ersetzt. Dieses wird von allen Seiten mit einer Luftströmung versorgt. Die Prinzipskizze hierzu befindet sich in Abbildung 10. Aufgrund der neuen Geometrie können Faserflore von 150 x 150 mm, einschließlich einer Randbeschnittbreite von bis

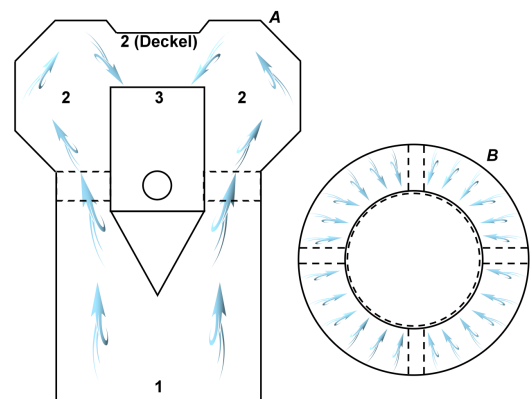


Abbildung 10: Prinzipskizze: 2. Generation

zu 10 mm, hergestellt werden. Dieses Format entspricht einer guten Größe für die Herstellung von Proben für einen 3-Punkt-Biegeversuch.

Die Gestaltung des Luftauslasses wurde dahingehend verändert, dass anstatt der dreieckförmigen Öffnung vier Rohrverbindungen den Luftauslass realisieren. Dies minimiert den Arbeitsaufwand für die Anpassung des großen, zylindrischen Bauteils, um den Unterbau des Auffangsiebes zu integrieren.

Eine technische Zeichnung befindet sich auf Seite 50 (ff). Auf Basis dieser Zeichnung wurde das Gebläse bestellt. Die benötigte Leistung wurde über strömungsmechanisch relevante Gleichungen überschlagen.

$$\text{Bernoulli – Gleichung (Druckform)} : p + \rho \cdot g \cdot z + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \text{const.} \quad (5)$$

$$\text{Kontinuitäts Gleichung} : \dot{m} = A \cdot v \cdot \rho \quad (6)$$

Die Ergebnisse der überschlagenen Werte befinden sich in Tabelle 8 auf Seite 36. Die zwei, in der Rechnung berücksichtigten Massenströme markieren die minimale und maximale Fördermenge des Gebläses. Eine Prinzipskizze ist in Abbildungen 10 dargestellt.

3. Generation

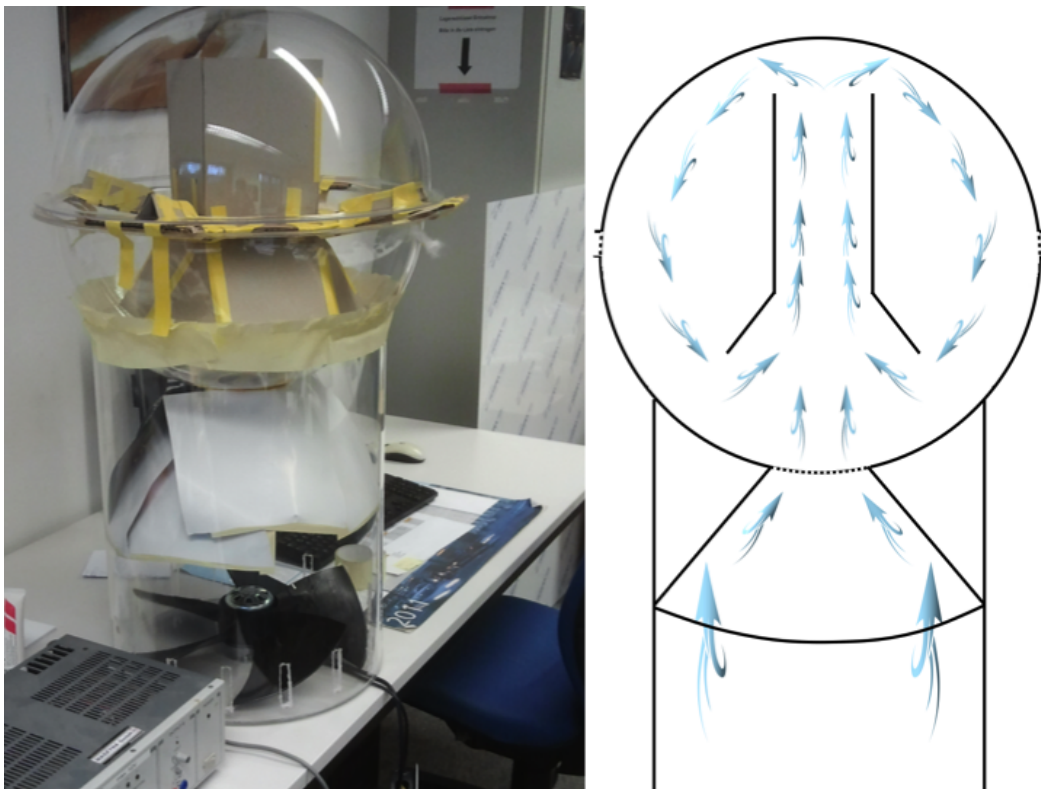


Abbildung 11: Laboranlage (links) & Prinzipskizze (rechts): 3. Generation v1

Um die Auflösung und Vermischung der Fasern zu verbessern, wird wie in Abbildung 11 dargestellt, eine zyklisch verlaufende Strömung realisiert. Hierzu wird ein Trichter unterhalb der ersten Halbkugel angebracht. Auf diese Weise werden die nach Außen wirkenden radialen Luftströme des Gebläses zu einer in der Mitte befindlichen Öffnung in der unteren Halbkugel geführt. Die radiale Luftströmung soll in eine axiale, nach oben gerichtete Luftströmung überführt werden. Die Querschnittsverengung führt jedoch zu einem steigenden Druckgradienten im Öffnungsquerschnitt. Dieser übersteigt die Leistung

des Gebläses. Die Luftströmung ist nicht in der Lage in die Halbkugeln vorzudringen, sondern wird aufgrund des hohen Druckgradienten an der Innenwand des Zylinders nach unten abgeführt. Der Bereich zwischen den Gebläseschaufeln und der Innenwand ist groß genug, um eine Luftströmung nach unten zu den Luftzugschlitzten zu gewährleisten. Mit Hilfe einer Fadensonde kann nachgewiesen werden, dass bei einigen Spalten die Luft in die Apparatur gesogen und bei anderen aus dieser gedrückt wird.

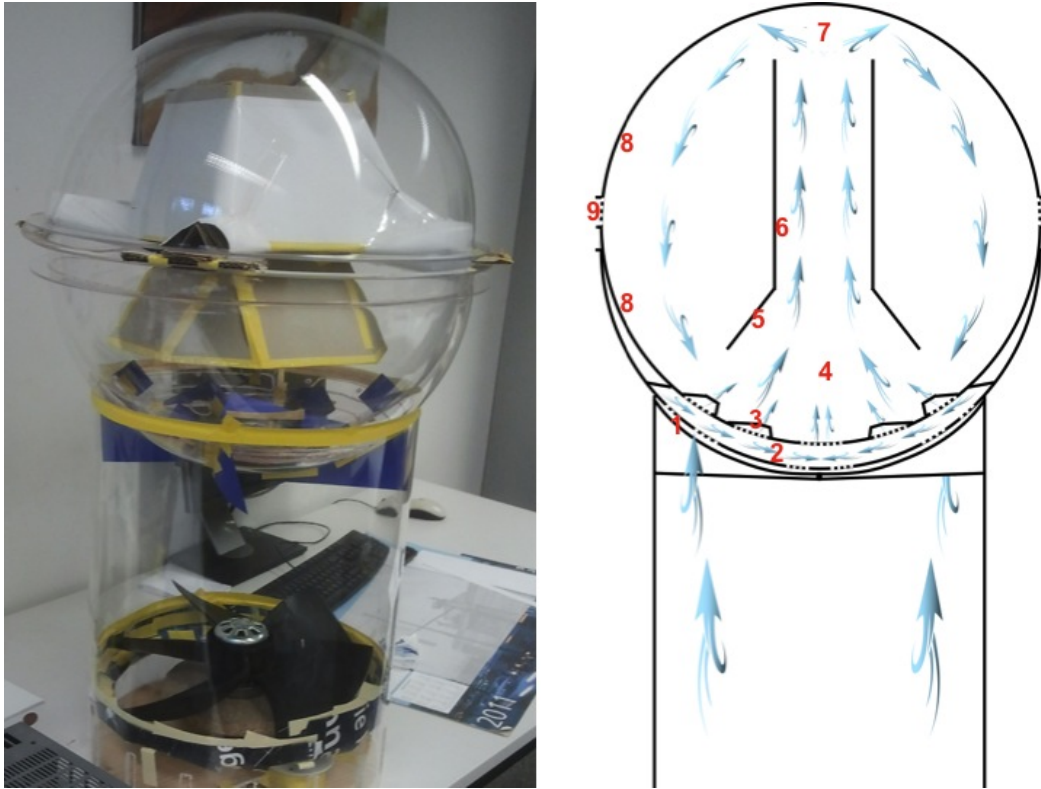


Abbildung 12: Laboranlage (links) & Prinzipskizze (rechts): 3. Generation v2

Um ein Rückströmen zu vermeiden, wird die Luftzufuhr in die Mischkammer verändert, indem ein doppelter Boden mit vormontierten Umlenkschaufeln eingebaut wird. Dies hat ebenfalls zur Folge, dass ein mögliches Eindringen von Fasermaterial in die Lüftungsanlage verhindert wird. Des Weiteren wird, um ein radiales Ausblasen der Luft durch die Luftzugschlitzte zu vermeiden, das Gebläse auf ein Podest gestellt, damit sich die Schaufeln oberhalb dieser befinden.

Der durch das Gebläse erzeugte, radial verlaufende Luftstrom wird über **Belüftungsschlitzte (1)** im unteren Boden in einen **Zwischenraum (2)** geführt und dort über **Düsen (3)** in die **Mischkammer (4)** geleitet. Das auf dem Boden der Kammer liegende Fasermaterial wird mit der Luftströmung durch einen **Trichter (5)** und anschließendes **Filtersystem (6)** geführt, in welchem die Auflösung der Fasern stattfindet. Erreicht der Luftstrom die **Kammerdecke (7)**, wird er aufgrund der Geometrie der Laboranlage nach unten geführt. Zwischen den **Halbkugelhälften (8)** tritt der Luftmassenstrom über eine mit einem Filter versehene **Öffnung (9)** aus. Der Filter setzt sich aus zwei Schichten zusammen. Die äußere Schicht besteht aus einem festen Vliesstoff mit einer Porengröße von 1 mm. Dieser umwickelt eine inne Schicht aus aufgelöster Watte. Im Kapitel 6 wird die Bedeutung des Filters näher erläutert. Die Öffnung muss mindestens einen Spalt von 2 cm Höhe besitzen, um den austretenden Luftmassenstrom zu entschleunigen. Wird eine kleinere Öffnung gewählt, besteht die Gefahr, dass Fasern aufgrund der starken Strömungsgeschwindigkeit in den Filter gezogen werden und diesen verstopfen. Ist die Spaltengröße korrekt gewählt, fallen die Fasern aufgrund ihres Eigengewichtes, unterstützt von einer leichten Sogströmung, in die Trichteröffnung und werden erneut von der nach oben gerichteten Luftströmung erfasst. Auf diese Weise kann der Auflöseprozess gesteuert und zeitlich beliebig fortgeführt werden.

Um ein Absetzen der Fasern auf die Halterung des Innenaufbaus zu vermeiden, wird eine Verkleidung angebracht, die ein Abgleiten von der Oberfläche ermöglicht. Ohne diese Verkleidung entstehen im momentanen Fortschritt der Laboranlage Totpunkte, in denen die Strömungsgeschwindigkeit der Luftströmung null ist.



Abbildung 13: Visualisierung der zirkulierenden Luftströmung

In Abbildung 13 ist eine Momentaufnahme eines Videos abgebildet. Um die Realisierbarkeit der zirkulierenden Luftströmung zu überprüfen, werden Styroporkugeln als Faserdymmies eingesetzt. Bei ca. 80% Leistungszufuhr beginnt eine kontinuierlich stattfindende Zirkulation.

Im nächsten Schritt werden die zuvor aus Pappe hergestellten Teile (*siehe Abbildungen 11 und 12 und 13*) aus Acrylglas angefertigt. Hierzu werden die 48 Einzelteile mit Hilfe einer Stichsäge aus einer 2 mm starken Platte ausgesägt. Unter Verwendung von Montagekleber für glatte Oberflächen werden Baugruppen erstellt (*siehe Abbildung 28 auf Seite 38*), um diese in die Laboranlage einbauen zu können.

Der fertige Laboraufbau der 3. Generation ist in Abbildung 14 dargestellt. Zu erkennen ist ein Netzteil mit einer eingestellten Ausgangsstärke von 1A und einer regelbaren Ausgangsspannung von 0-10V. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Gebläses kann durch Einstellen der Ausgangsspannung von einem Minimum (1V) bis zum einem Maximum (10V) stufenlos regelbar eingestellt werden. Das Datenblatt des Gebläses befindet sich ab Seite 78 im Anhang. Dieses gibt unter anderem Auskunft über die Stromversorgung, Leistung und die Anschlussmaße.



Abbildung 14: Fertiger Laboraufbau der 3. Generation

4. Generation

Die 4. Generation entwickelt sich aus Erkenntnissen, die mit der 3. Generation gesammelt wurden. Aufgrund von Verlusten bei der Überführung eines radialen in einen axialen Luftstroms reichte die Strömungsgeschwindigkeit zwar für Styroporkugeln aus, die Fasern bleiben jedoch am Boden liegen. Es wurden verschiedene Möglichkeiten unternommen, diese Feststellung zu kompensieren. Zum einen wurde der doppelte Boden entfernt und ein Umlenkschaufel-system geschaffen, welches die vom Gebläse kommende Luftströmung direkt in die untere Halbkugel überführt. Zu sehen ist diese Anordnung in Abbildung 20 auf Seite 20. Zum anderen wurde ein Kegel in die Mitte der unteren Halbkugel montiert. Die Fasern sollten auf diese Weise zu den starken, äußeren Düsen gleiten, um in die nach oben gerichtete Luftströmung überführt zu werden. Dieser in im Anhang auf Abbildung 30 dargestellt. Die Größte Veränderung im Vergleich zur dritten Generation ist die fehlende Umwandlung des radialen Luftstroms. Die Auflösung und Vermischung findet nicht mehr innerhalb eines oberhalb der Fasern liegenden Filtergehäuses, sondern auf einer Kreisingebene statt. Die Prinzipskizze in Abbildung 15 zeigt die Luftstromverläufe innerhalb der Laboranlage. Die radial verlaufende Strömung wird über Düsen in die Mischkammer geleitet. Dort verursacht sie eine kreisende Strömung und tritt am Deckel und dem Mittelaufbau nach Passieren von Filtergewebe aus.

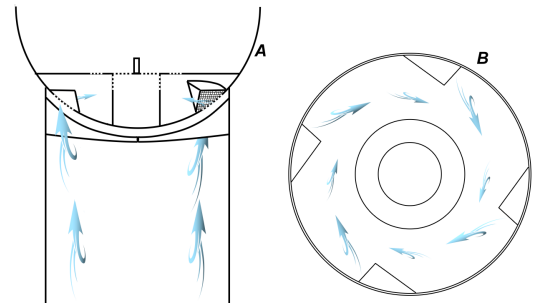


Abbildung 15: Prinzipskizze: 4. Generation v1

Um die Luftstromverläufe zu optimieren, werden Umlenkelemente zwischen den Düsen angebracht. Auf diese Weise werden die Fasern effektiver von der Luftströmung geführt. Ebenfalls erhöht es die Strömungsstärke im Bereich zwischen der Düsenöffnung und dem Mittelaufbau. Um Totpunkte im Bodenbereich zu neutralisieren, erhält der Mittelaufbau einen kegelförmigen Fuß. Dadurch befinden sich die Fasern stetig innerhalb des Luftstromes.

Auf den Umlenkelementen wird ein Kreisring befestigt. Dieser dient als Aufsetzpunkt für den Deckel. Um einen Formschluss zwischen Deckel und Kreisring, bzw. Mittelaufbau zu gewährleisten, werden nachgebende Fensterisolierungsstreifen an den Auflagestellen befestigt. Diese sind in Abbildung 17 zu sehen.

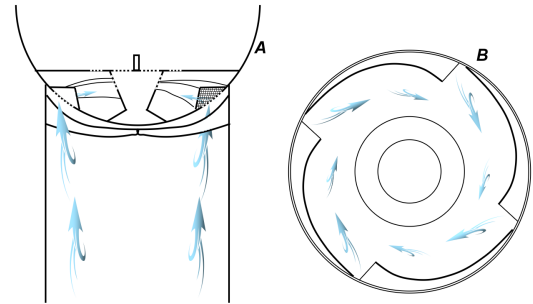


Abbildung 16: *Prinzipskizze: 4. Generation v2*

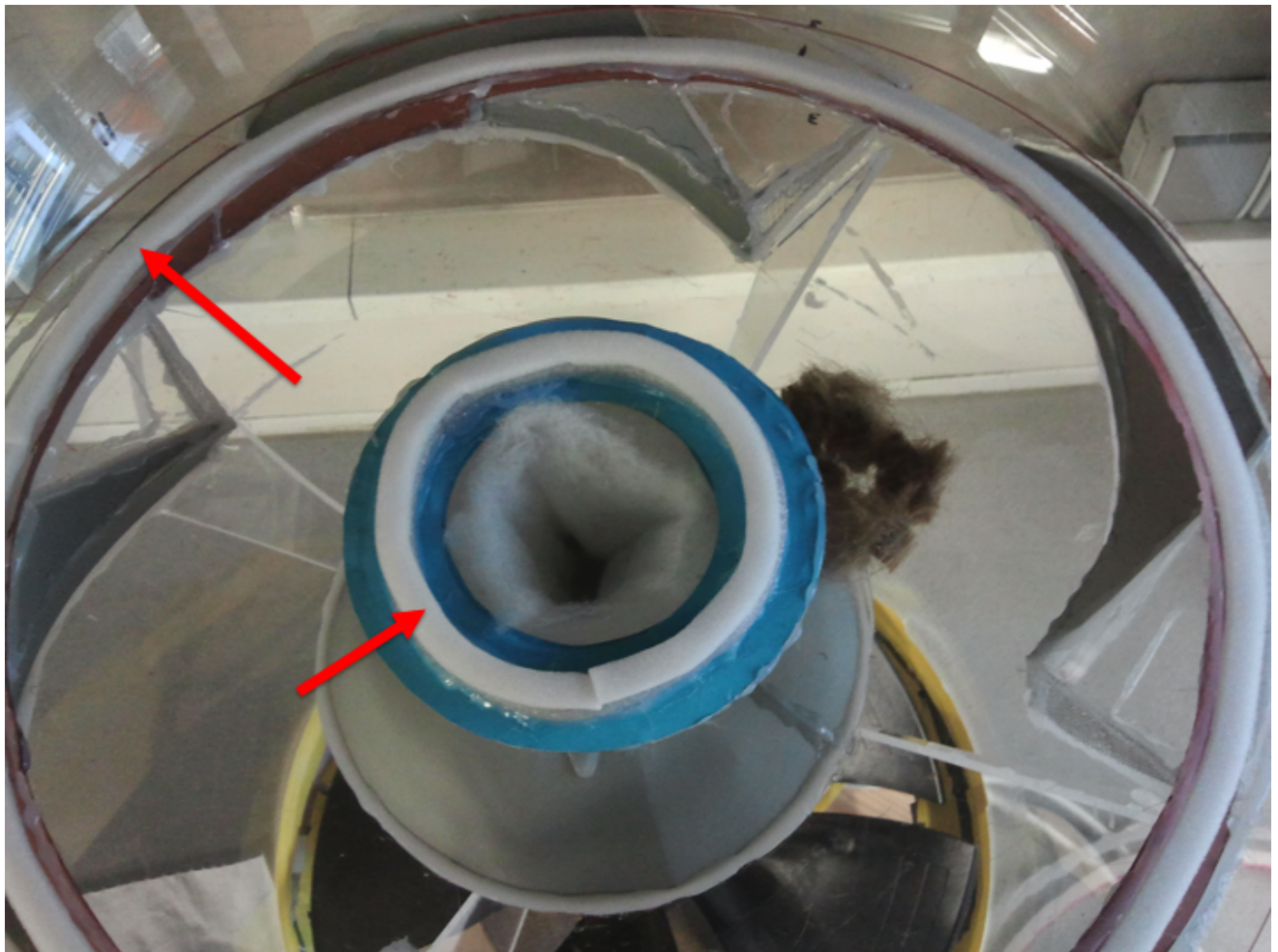


Abbildung 17: *rot: Dichtung*

5.4 Materialbeschaffung

Die ersten zwei Generationen der Laboranlagen sahen eine begrenzte Anzahl an Fertigungsteilen vor. Nach dem Erhalt einiger Kostenvoranschläge mussten diese Aufbauten jedoch verändert werden. Die Materialkosten für die Formen der Spritzgußteile umfassten rund 90 % des Gesamtpreises. Dies überstieg die Möglichkeiten einer Anlage im Labormaßstab. Aus diesem Grund ist das Konzept einer steten Zirkulation zur Auflösung und Vermischung entstanden.

Für die Wahl des Zylinders und der Acrylglasplatten wurde die Firma *W. MAX WIRTH GmbH* aus Braunschweig gewählt. Ausschlaggebend für die Auswahl dieses Anbieters war dessen Preiskalkulation.

Die Acrylglashalbkugeln wurden von der *MODULOR GmbH* aus Berlin erworben. Sie stellten die einzigen zu findenden Halbkugeln aus Acrylglas dar, die eine vertretbare Kombination aus Kosten und Nutzen besaßen.

Das Gebläse stammt von der Firma *EBM-PAPST MULFINGEN GmbH & Co. KG*. Nachdem die grobe Auslegung der Laboranlage der 2. Generation abgeschlossen war, wurde nach einem stufenlos regelbarem Ventilator gesucht. Da das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) industrielle Vertragspartner im Bereich der Elektronik besitzt, musste zunächst bei diesen gesucht werden. Der *EC – Axialventilator – HyBlade®* erfüllte diese Anforderung und besaß die passenden Abmessungen.

Die Produkte dieser drei Firmen sind auf Abbildung 18 abgebildet.

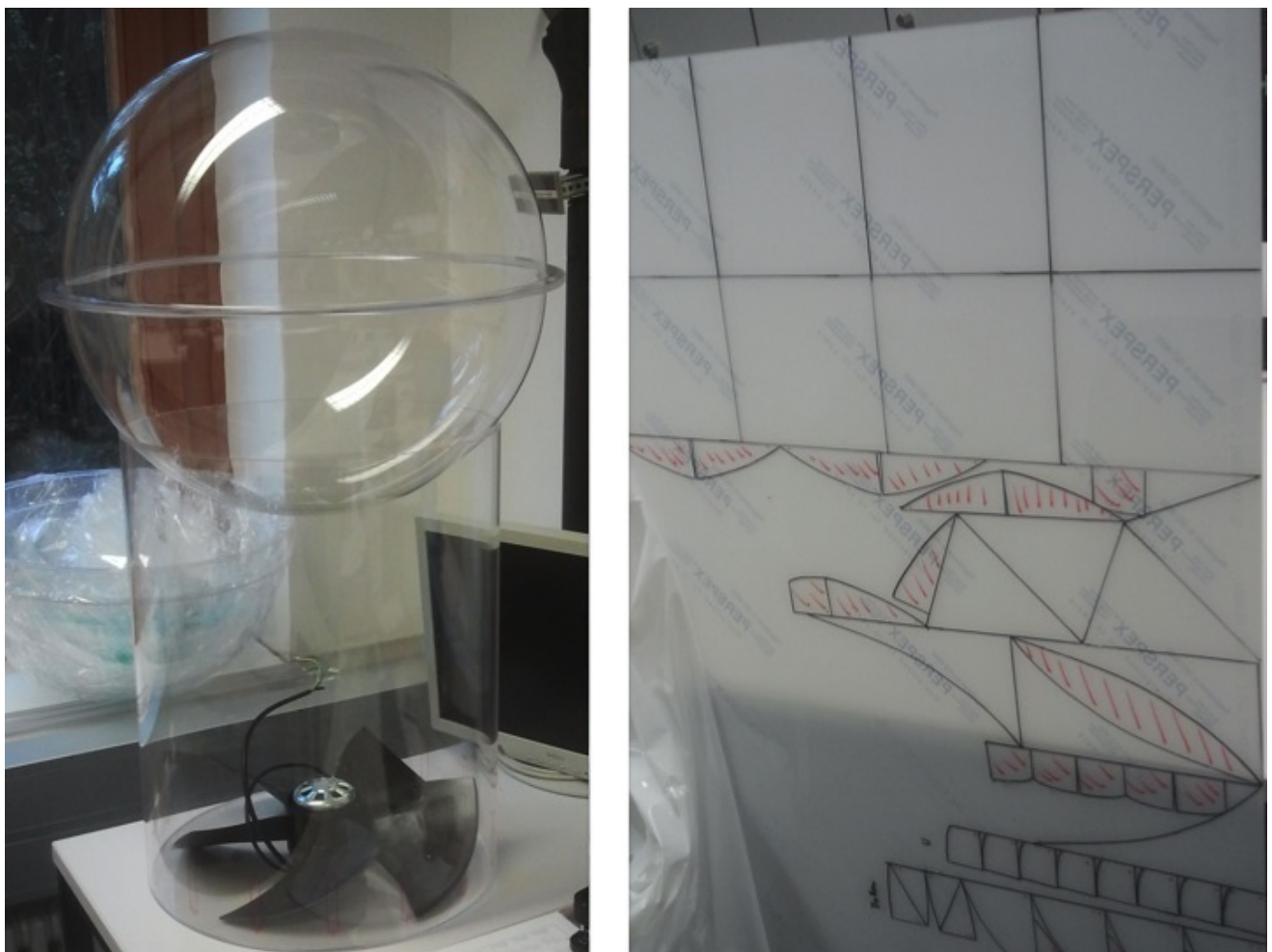


Abbildung 18: Die Acrylglasteile, sowie der Axialventilator

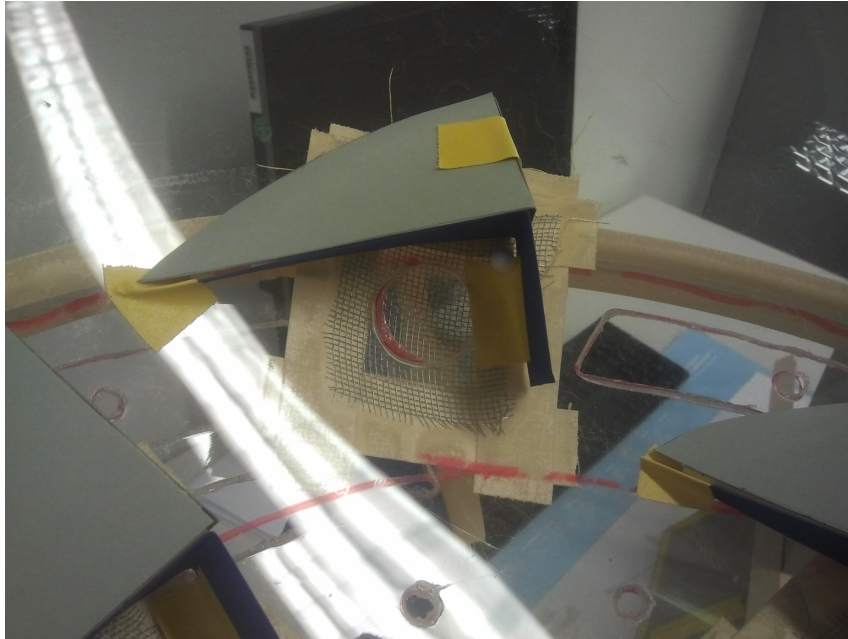


Abbildung 19: *Dummy eines Luftstromumlenkers*

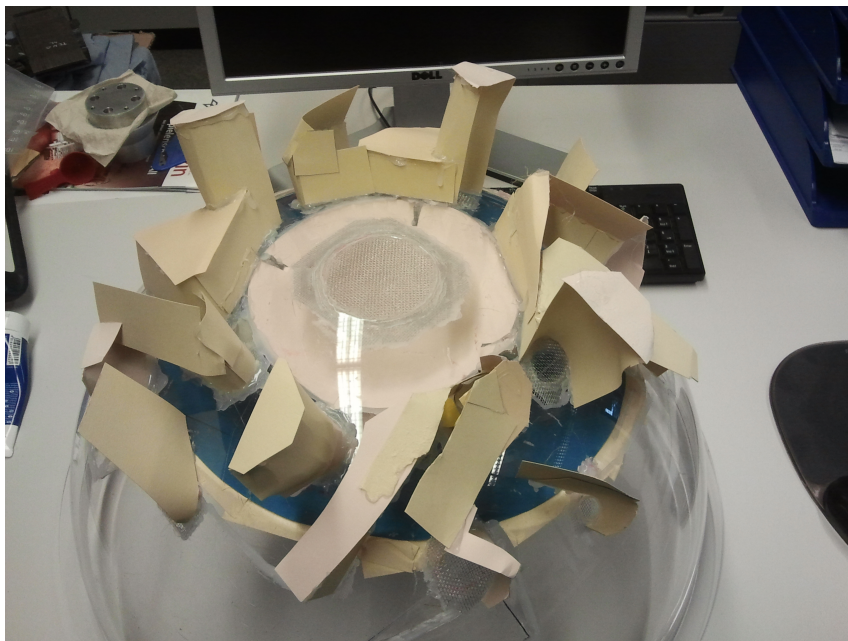


Abbildung 20: *Dummies eines Umlenkschaufeldsystems*

Dummyelemente wurden zunächst aus Pappkarton hergestellt. Diese Methode war kosteneffektiv und schnell. Auf diese Weise konnten mehrere Kombinationen und Umsetzungsmöglichkeiten ausgetestet werden und im späteren Entwicklungsstadium leicht durch ein Acrylglaspendant ersetzt werden. Die übrigen Bauteile und Werkmittel konnten aus Baumärkten bezogen werden. Dies beinhaltete Klebstoffe, Filter und Isoliermaterialien.

6 Laboranlage: Betrieb

Die im folgendem Bild dargestellte Laboranlage beinhaltet jegliche Optimierungen der 4. Generation und wird für die Ermittlung der Versuchsergebnisse verwendet.



Abbildung 21: Endgültige Versuchsanordnung

6.1 Sicherheit

Der Aufbau ist wie in Abbildung 21 gezeigt vorgenommen. Beim Vermischungsvorgang von NF und CF sind wichtige Vorkehrungen zu treffen. Im **grundlegendem Umgang** mit losem Fasermaterial sollte ständig eine Schutzbrille getragen werden. Bei Augenkontakt mit Fasern kann dies zu Reizungen führen. Des Weiteren empfiehlt sich ein unnötiges Umherfliegen von Fasern zu vermeiden. Diese können in die Atemwege eindringen und ebenfalls zu Reizungen führen. Da jedoch eine vollständige Vermeidung nicht möglich ist, ist es ratsam die Wege für die Versuchsdosierung so gering wie möglich zu halten. Außerdem sollte ein Arbeitsplatz gewählt werden, der nicht gegen umherfliegende Partikel sensibel ist.

Im speziellen Fall beim **Umgang mit CF** müssen zusätzliche Vorkehrungen getroffen werden. Kohlenstaub kann bis zu $1 \mu\text{m}$ klein sein.[8] Es besteht dadurch die Gefahr einer Lungenfibrose, wie sie beispielsweise bei Arbeitern in Erzbergwerken mit vernachlässigten Sicherheitsbestimmungen anzutreffen ist.[9] Aus diesem Grund muss es unterbunden werden, Kohlenstaub einatmen zu können. Des

Weiteren schadet er ebenfalls elektronischen Geräten. Da Kohlenstaub elektrisch leitend ist, bestünde die Gefahr eines Kurzschlusses, sollte sich dieser auf Platinen oder sonstigen elektrischen Geräten absetzen.

Über Filter, die in die Konstruktion integriert wurden, soll der feine Kohlenstaub an den Abluftöffnungen abgefangen werden. Als Grobfilter genügt ein engmaschiges Gittergeflecht. Dieses dient zum einen den Fasern ($l > 5mm$) als Sperre und zum anderen bildet sie einen festen Untergrund für die weichen Feinfilterlagen. Als Feinfiltergewebe wird ein Fettvlies, welches normalerweise bei Dunstabzugshäuben einen Einsatz findet, verwendet. Die Lücken zwischen den Vliesfasern sind zwar größer als $1\ \mu m$, jedoch muss der Luftstrom das gesamte Fasergewebe durchdringen, um zum Luftaustritt zu gelangen. Während des Durchströmvorgangs verfangen sich die luftfremden Partikel, wie der Kohlenstaub, im Vlies und werden dadurch aus der Luft gefiltert. Zur Sicherheit wird die Filterwirkung durch mehrmaliges hintereinander Legen von Vliesflächen verbessert und durch Falten optimiert. Die Filteranordnung ist in Abbildung 22 dargestellt.

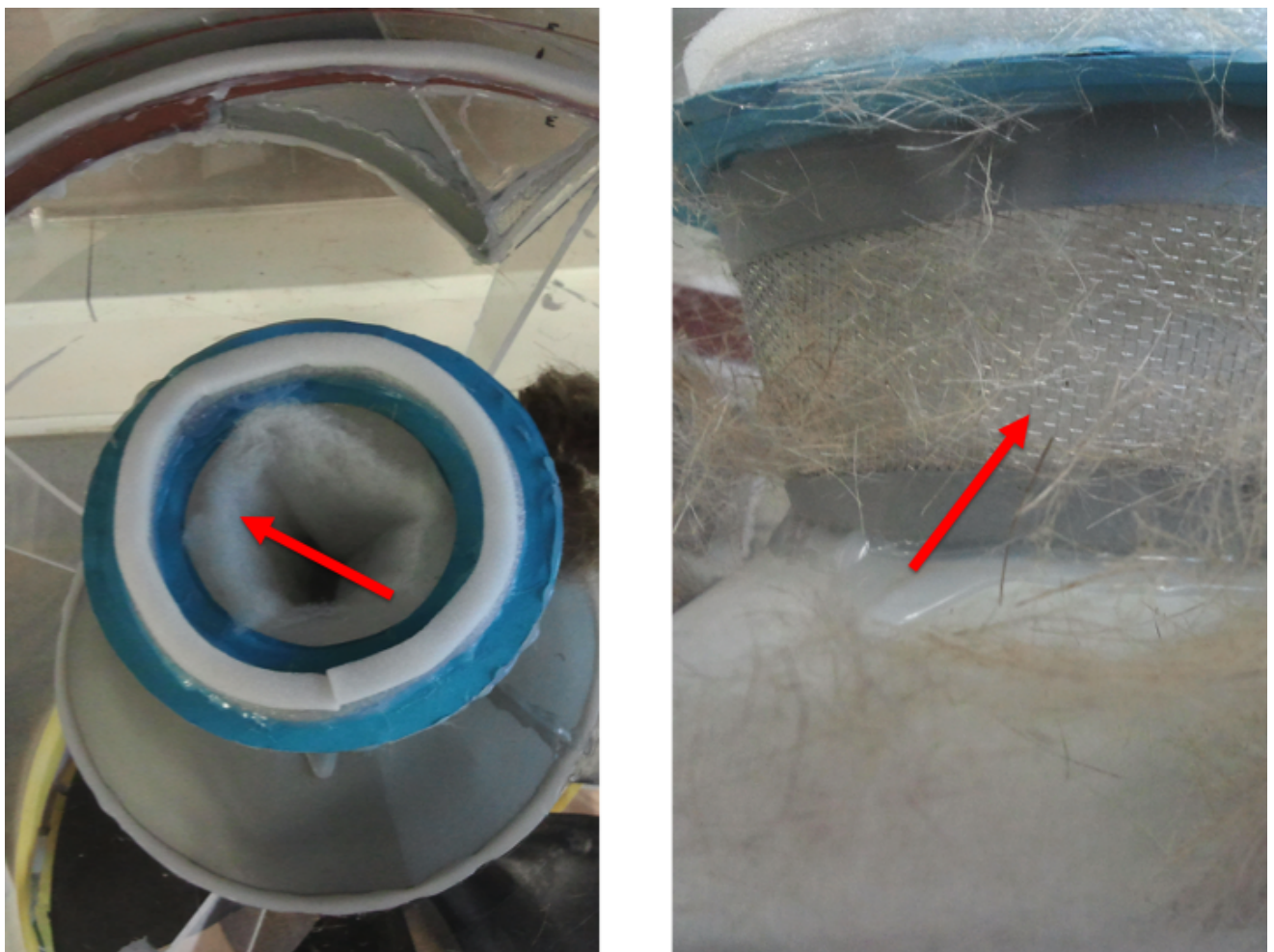


Abbildung 22: Feinstaubfilter (links), Grobfilter (rechts)

Um den Axialventilator vor möglichem herabfallenden Kohlestaub bei der Faserentnahme zu schützen, erhielt er eine Haube (Siehe Abbildung 29 auf Seite 38)). Diese dreht sich mit dem Ventilator mit und wurde mit einer weißen Spirale versehen. Dies dient zur schnellen optischen Kontrolle bei niedrigen und somit leisen Drehgeschwindigkeiten, ob der Ventilator in Rotation ist.

Während der Versuchsdurchgänge befindet sich die komplette Anlage innerhalb eines Abzugs. Dies verhindert ein unkontrolliertes Herumfliegen von Fasern und Stäuben bei der Entnahme. Als Persönliche Schutzausrüstung (PSA) werden Schutzbrille, Gummi- bzw. Stoffhandschuhe und eine Atem-

schutzmaske mit Partikelfilter verwendet. Dies ist nötig, da die Atemwege bei Befüllung der Laboranlage und Entnahme des Fasermaterials den luftfremden Partikeln ausgesetzt sind.

6.2 Versuchsdurchführung

6.2.1 Auflösung

Bevor komplette Mischversuche stattfinden, werden Versuche zur Faserauflösung durchgeführt. Dies dient dazu, um Werte für die dem Gebläse zuzuführende Leistung und die Dauer des Versuchsdurchgangs zu ermitteln. Die Ermittlung der benötigten Leistung soll zeigen, ob der Versuch bei auch bei geringeren Gebläseleistung durchführbar ist und ob dieses sogar einen positiven Effekt auf die Auflösung und Vermischung hat. Die Versuchsdauer soll aufgrund der Effizienz ermittelt werden. Es sollen möglichst viele Durchläufe in geringster Zeit stattfinden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 eingetragen.

Die **Menge** gibt die Masse an verwendeten Fasern an. Der erste Wert beschreibt die Masse vor und der zweite Wert nach den Versuchsdurchgängen. Die Abweichungen der Zahlen kommt insofern zustande, dass ein Rest nicht entfernter Fasern in der Anlage verbleibt und schwer zu entnehmen ist.

Die **Zeit in der Anlage** gibt an, wie lange der Auflösungsprozess durchgeführt wurde. Die Zählung beginnt bei Erreichen der Ausgangsspannung und endet bei dessen Verlassen.

Die **Spannung** gibt die am Netzgerät eingestellte Ausgangsspannung an. Die Anlaufspannung des Gebläses beträgt hierbei 1 V. Maximal können 10 V zugeführt werden. Dies entspricht der maximalen Umdrehungszahl.

Die **Anlaufzeit** gibt an, in wievielen Sekunden die Ausgangsspannung des Netzgerätes eingestellt wurde.

Die **Abklingzeit** beschreibt das Gegenteil der Anlaufzeit. Sie beginnt ab dem Zeitpunkt, wo die Ausgangsspannung verlassen wird und endet beim Stillstand des Ventilators.

Proben-Nr.	Menge (vor/nach) [g]	Zeit in der Anlage [min]	Spannung [V]	Anlaufzeit [s]	Abklingzeit [s]
1	3,0 / 2,7	01:13	9	10	10
2	3,0 / 2,9	02:30	9	10	10
3	3,0 / 2,9	03:30	9	10	10
4	3,0 / 3,0	04:30	9	10	10
5	3,0 / 3,0	05:30	9	10	10
6	3,0 / 3,0	02:30	10	10	12
7	3,0 / 2,9	03:30	10	10	12
8	3,0 / -	04:30	10	14	12
9	6,0 / -	04:30	10	-	-
10	4,0 / 3,6	04:30	10	12	13
11	4,4 / 3,8	04:30	10	14	13
12	4,0 / 3,7	04:00	10	16 + 1:30	13
13	3,0 / 3,0	06:00	10	22 + 1:44	13
14	3,0 / 3,0	06:00 + 00:45	10	18 + 1:52	13
15	0,8 / 0,8	06:00	10	22	13
16	3,0 / 3,0	06:00	10	15	12
17	3,0 / 3,0	06:00	10	16	13

Tabelle 2: Daten des Versuchsprotokolls: Faserauflösung

Bemerkungen zu Tabelle 2:

Probe 8	Fasern zirkulierten nicht
Probe 9	Durchgang abgebrochen; aufgrund zu vieler Fasern
Probe 10	Stillstand bei 2:20 min.; durch Klopfen gegen die Anlage gelöst; Verwendung Probe 9 unter Entnahme von 2 g Fasermaterial
Probe 14	Stillstand bei 3:00 bis 3:45; durch Klopfen gegen die Anlage gelöst
Probe 15	Verwendung von unaufgelöstem Fasermaterial aus Probe 14

Bei einem ausreichendem Auflösegrad der Fasern besteht die Gefahr, dass das entstandene Faserflor sich in der Engstelle zwischen Düse und Mittelaufbau verkeilt. Die Faserabstände sind in diesem Fall ausreichend, um die zirkulierende Luftströmung hindurch dringen zu lassen. Um von dieser mitgezogen zu werden, fehlt es dem Flor an geeigneter Fläche. Versuche haben gezeigt, dass die Zugabe eines oder mehrerer Röhrelemente einen auf diese Weise entstandenes Verstopfen verhindert. Ein solches Röhrelement ist in Abbildung 31 auf Seite 39 abgebildet.

6.2.2 Mischung

Für die Mischversuche wird ein Mischverhältnis von 80% NF und 20% CF eingestellt. Da sich 3 g als geeignete Menge erwiesen hat, werden für die Versuchsdurchgänge 2,4 g NF und 0,6 g CF verwendet. Beide werden abgewogen und in die Laboranlage gegeben. Die NF werden in aufgelöster Form der Anlage zugeführt, die CF in unaufgelöstem Zustand. Der Ablauf und die Dokumentation der Durchführung ist kohärent mit der der Auflösung. Da sich die CF lediglich am Boden fortbewegen und sich nicht mit den NF vermischen, werden die sie vor Beginn der Versuche bearbeitet. Zunächst wird die gewünschte Menge in Wasser aufgelöst und getrocknet. Dies geschieht über 3 Tage bei Raumtemperatur zwischen zwei Lagen Papier. Anschließend werden sie mit den Fingern leicht aufgerieben und der Anlage in gewünschter Menge hinzugegeben.

Umso feiner die CF auf diese Weise aufgelöst werden, desto besser ist das Mischergebnis. In Abbildung 27 ist das Ergebnis der Probe 7 dargestellt. Im linken Bereich des Bildes sind geschwärzte Fasern zu erkennen. Diese Färbung findet zum einen durch Kohlenstaub, auf der anderen Seite durch Vermischung von NF und CF statt und ist auf den Filterflächen zu finden. Die Sogwirkung ist dafür verantwortlich, dass sich die beiden Faserarten dort absetzen.

Proben-Nr.	Menge (vor/nach) [g]	Zeit in der Anlage [min]	Spannung [V]	Anlaufzeit [s]	Abklingzeit [s]
1	(2,4/0,6) / -	06:00	10	20	13
2	(2,4/0,6) / -	06:00	10	16	13
3	(2,4/0,6) / (3,0) + 0,8 H ₂ O	10:00	10	18	18
4	(2,4/0,6) / (3,0)	05:30	10	16 + 44	12
5	(0,8/0,6) / (-)	06:00	10	16	13
+	(0,8/ -) / (-)	06:00	10	15	13
+	(0,8/ -) / (3,0)	06:00	10	15	13
6	(0,8/0,6) / (-)	03:00	10	15	15
+	(0,8/ -) / (-)	06:00	10	13	12
+	(0,8/ -) / (3,2)	06:00	10	15	13
7	(2,4/ 0,6) / (3,0)	06:00	10	16	12

Tabelle 3: Daten des Versuchsprotokolls: Fasermischung

Bemerkungen zu Tabelle 3:

Probe 1	wurde nicht entnommen; ohne Entnahme für Probe 2 genutzt
Probe 3	CF wurden zuvor in Wasser aufgelöst und feucht in die Anlage gegeben
Probe 4	blockiert; durch Klopfen gelöst (bei 01:00)
Probe 5	blockiert im 3. Durchgang bei 5:00 bis Ende
Probe 6	Gestiegene Endmasse aufgrund von Materialresten des Vorversuchs in der Anlage

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Möglichkeit einer Vermischung von NF und CF mit Hilfe eines aerodynamischen Verfahrens anhand einer selbst entwickelten Anlage im Labormaßstab untersucht. Im besonderen Fokus stand dabei das Erreichen eines hohen Auflösegrades der NF. Im Zuge der Entwicklung und Konstruktion der Laboranlage wurden Skizzen und technische Zeichnungen angefertigt.

Begonnen wurde mit der Definition eines Vliesstoffes und der Aufteilung dessen Faserbestandteile in zwei grundlegende Materialbereiche, Chemiefaserstoffe und Naturfaserstoffe. Weitergehend folgte eine kurze Erläuterung der Bedeutung des Fasermaterials für einen Verbundwerkstoff und welche physikalischen Veränderungen Faserwerkstoffe innerhalb eines Verbundes mit einem Kunststoff mit sich führen. Nachdem die Untergruppen von Chemie- und Naturfaserstoffe kurz benannt wurden, erfolgte ein Einblick in die Herstellungsmethoden von Vliesstoffen. Diese wurden in Nass- und Trockenverfahren gegliedert. Das prinzipielle Nassverfahren wurde kurz erläutert. Da es mehrere Umsetzungsmöglichkeiten für die Herstellung eines Vliesstoffes mit Hilfe des Nassverfahrens gibt, wurde auszugsweise ein Beispiel für ein hydrodynamisches Herstellungsverfahren gewählt, skizziert und beschrieben. Des Weiteren folgten Funktionsprinzipien und Fertigungsbeispiele für Trockenverfahren. Als Herstellungsmethoden wurden die, dem Trockenverfahren untergeordnete, mechanische und aerodynamische Verfahren, sowie das Extrusionsverfahren behandelt. Das Grundlagenkapitel endete mit der Einführung in die hybriden Vliesstoffe. Kurz erläutert waren dort Merkmale und Herstellungsproblematiken.

Im Stand der Technik wurden Anwendungsbereiche von hybriden Faserverbundwerkstoffen unter Verwendung von GFK, CFK und NFK genannt und die Vorteile einer Faserbeimischung näher beleuchtet. Anschließend wurden Möglichkeiten zur Faservermischung genannt und eine Übersicht über bereits stattgefundene Arbeiten gegeben. Aus diesen wurde ersichtlich, dass ein Mischvorgang von NF und CF mit Hilfe eines Nassverfahrens zu ineffektiv ist, da ein großer zeitlicher Ansatz für den Mischvorgang gewählt werden musste.

Als nächstes folgte der konstruktive Abschnitt dieser Arbeit. Er zeigte, einige von der Laboranlage zu erfüllende, Anforderungen auf und beschrieb vier mögliche Umsetzungsvarianten. Über die entstandene Anforderungsliste wurde eine Variante ausgewählt und auf Basis dieser mit der Konstruktion der Laboranlage begonnen. Es folgten die Dokumentation der Entwicklungsschritte theoretischer, mit Hilfe eines CAD-Programms entworfener, technischer Zeichnungen. Diese wurden von Prinzipskizzen begleitet. Weiterführend sind die, hauptsächlich aus Skizzen und praktischen Versuchen entstandenen, Umsetzungen der Laboranlage dargestellt und deren Funktionsweise erläutert. Die Gründe für die Entwicklung einer neuen Generation und die dabei gesammelten Erfahrungen wurden ebenfalls dokumentiert. Nach Abschluss der final entwickelten Generation wurde auf die Materialbeschaffung eingegangen. Diese gibt die Bezugsquellen der verwendeten Materialien an.

Die Schlussbetrachtung mit einer Zusammenfassung und einem persönlichem Fazit bildete den Abschluss dieser Ausarbeitung.

7.2 Fazit

Aus den Versuchen mit Hilfe eines Nassverfahrens wurde deutlich, dass eine Auflösung der hydrophoben NF nur schwer und unter langem Zeitansatz zu realisieren war. Die beizumischenden CF hingegen verhielten sich hydrophil und lösten sich bei geringem Kontakt mit Wasser auf. Aus diesem Grund war es wichtig, bei einem aerodynamischen Mischverfahren die Auflösung der NF zu gewährleisten.

Die Entwicklung der 3. Generation war zunächst vielversprechend. Einen Monat nach Erstmontage konnte mit Hilfe von kleinen Styroporkugeln der gewünschte Strömungsverlauf bei 60% Leistung des Gebläses nachgewiesen werden. Die Annahme, dass innerhalb der noch verfügbaren 40% die Strömungsleistung für die NF ausreichen würde, war jedoch falsch. Sofern sich die Fasern nicht auf den

äußeren, stärkeren Düsen befanden, konnte keine Bewegung beobachtet werden. Mehrere Versuche wurde unternommen, die Luftströme auch bei den mittel und innen gelegenen Düsen zu steigern. Beispielsweise wurden Luftlöcher, die zuvor lediglich der Hinführung zu Düsenöffnungen dienten, zu Düsen ausgebaut. Ebenso wurden Umlenkschaufeln eingesetzt, um starke Luftströme vom Außenbereich der radialen, vom Gebläse kommenden Luftströmung in den Innenbereich zu lenken. Als dies ebenfalls keinen hinreichenden Effekt erzielte wurde ein Kegel in die untere Halbkugel gesetzt. Dieser sollte herabfallende Fasern zu den äußeren Düsen führen. Dies funktionierte zwar, jedoch blieben Totpunkte zwischen Düsen übrig. Die Entwicklung einer 4. Generation war aus diesen Gründen unausweichlich. Der schmale Strömungskanal in Kombination mit der starken, radialen Strömung, erbrachte gute Auflösungsergebnisse. Bei der Vermischung beider Faserarten zeigte sich jedoch das träge Verhalten der CF innerhalb der Luftströmung. Sie streiften lediglich über den Boden des Laboraufbaus. Es empfahl sich daher, die CF zuvor in Wasser aufzulösen und getrocknet in die Laboranlage zu geben. Nach anschließender Auflösung, indem die CF zwischen den Fingern zerrieben wurden, war eine Vermischung zu beobachten. Auch die CF wurden aufgewirbelt und schlossen sich mit den NF zusammen.

Eine Steigerung der Effektivität lässt sich durch den Einsatz von Rührelementen realisieren. Diese unterstützen die Vermischung der beiden Faserarten durch Erzeugung zusätzlicher Turbulenzen innerhalb der Luftströmung. Des Weiteren muss eine Vorauflösung der CF statt finden. In den durchgeführten Versuchen wurden die CF in Wasser aufgelöst und luftgetrocknet. Im Anschluss wurden sie aufgelöst, indem sie zwischen den Fingern aufgerieben wurden. Dieses Auflösungsverfahren sollte verbessert werden, da es relativ umständlich und langwierig ist. Um ein Verstopfen der Fasern zu verhindern, würde sich ein Vibrieren des Mischgehäuses anbieten. Dieses wurde in den Versuchen durch Klopfen umgesetzt und führte in allen Fällen zur Wiederaufnahme der Rotation.

7.3 Ausblick

Die Laborversuche zeigten, dass die Vermischung von NF und CF nicht einfach zu realisieren ist. Jedoch ist der Nutzen, der aus dieser Kombination entsteht lohnenswert. Ein hybrider Werkstoff aus NF und CF ermöglicht in vielen Bereichen des heutigen Alltagsleben eine spürbare, technische Verbesserung. Beispielsweise Verkleidungselemente würden an Masse verlieren und aufgrund der Gewichtseinsparung könnten sich im Bereich der Mobilität Fahrzeuge schneller und energieeffizienter fortbewegen. Außerdem belastet ein Werkstoff mit hohem natürlichem Anteil die Ressourcen unseres Planeten weniger, als die Umsetzung mit künstlichen Werkstoffen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] ALBRECHT, Wilhem ; FUCHS, Hilmar ; KITTELMANN, Walter: *Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaft, Prüfung*. WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000
- [2] KROLL, Lothar ; ULKE, Lars ; SEIDLITZ, Holger: *Analytische Berechnung von Schichtverbunden*. TU Chemnitz, Strukturleichtbau Kunststoffverarbeitung, 2013
- [3] *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, 2003
- [4] SCHÜRMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer-Verlag, 2007
- [5] M. FOLHOFFER GMBH & CO. KG: *Faserarten*. <http://www.folhoffer.eu/faserarten-ct-1557.html>. 1, Abruf: 2014.02.19
- [6] VIEWEG+TEUBNER VERLAG, 2009 (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe; Grundlagen-Verarbeitung-Anwendungen*. 3. AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., 2010
- [7] GERBER, Ueli: *Velobekleidung - Faserkunde*. <http://veloagenda.ch/Bekleidung/faserkunde.htm>. 1. Version: Oktober 2006, Abruf: 2014.02.20
- [8] K-W-H LANGEL FILTERSYSTEME GMBH: *Filtertechnik: HEPA und andere*. <http://www.kwh-filtersysteme.de/Umweltschutz/hepa.htm>. 1, Abruf: 2014.02.25
- [9] BUNDESVERBAND DER PNEUMOLOGEN ; DEUTSCHE LUNGENSTIFTUNG E.V.: *Lungenfibrose*. <http://www.lungenaerzte-im-netz.de/lin/linkkrankheit/show.php3?p=1&id=102&nodeid=22>. 1, Abruf: 2014.02.25
- [10] POLYMER GROUP INC. (PGI): *Web Formation*. <http://www.pgi-industrial-europe.com/en/web-formation>. 1, Abruf: 2014.02.19
- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Faserverbund-Kunststoffe (Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften)*. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 2006